

文章编号: 1007-2993(2023)01-0042-05

安哥拉红砂与中国马兰黄土渗透特性对比研究

李 硕¹ 徐青青² 乔建伟³ 柳 旻³

(1. 中国水利水电工程建设咨询西北有限公司, 陕西西安 710100; 2. 陕西省水利电力勘测设计研究院勘察分院, 陕西咸阳 712000; 3. 机械工业勘察设计研究院有限公司, 陕西西安 710043)

【摘要】 通过室内变水头渗透试验和现场双环注水试验, 测试了安哥拉罗安达红砂的渗透系数。基于试验结果并参考相关文献, 对比分析了安哥拉红砂与中国马兰黄土的渗透特性。结果表明, 室内试验测得的天然红砂渗透系数为现场试验测试结果的 1/8, 室内试验测得的压实红砂渗透系数与现场试验测试结果相近。红砂渗透系数的对数与孔隙比正相关, 随孔隙比增加而线性增加, 工程建设中可按孔隙比估算红砂渗透系数。天然状态下红砂渗透系数约为马兰黄土渗透系数的 10 倍, 且现场试验结果均大于室内试验结果。红砂和马兰黄土均存在水平入渗和垂直入渗, 但红砂的入渗距离大于马兰黄土。红砂入渗过程主要为非饱和和渗透, 而马兰黄土入渗过程主要为饱和和渗透。研究结果可为红砂地区工程建设提供参考。

【关键词】 安哥拉; 红砂; 马兰黄土; 渗透系数

【中图分类号】 P 642; TU 441⁺.3

【文献标识码】 A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2023.01.008

Contrastive Study on Permeability Characteristics of Angolan Red Sand and Chinese Malan Loess

Li Shuo¹ Xu Qingqing² Qiao Jianwei³ Liu Min³

(1. China Northwest Water Conservancy & Hydropower Engineering Consulting Co., Ltd., Xi'an 710100, Shaanxi, China; 2. Shaanxi Province Institute of Water Resources and Electric Power Investigation and Design Investigation Branch, Xianyang 712000, Shaanxi, China; 3. China JK Institute of Engineering and Design Co., Ltd., Xi'an 710043, Shaanxi, China)

【Abstract】 The permeability coefficients of Luanda red sand in Angola is measured by laboratory variable head permeability test and double-ring water infiltration test. Based on the test data and references, the permeability characteristics of Angola red sand and Chinese Malan loess were compared and analyzed. The results show that the permeability coefficient of natural red sand in laboratory test is 1/8 of that in field test, and the permeability coefficient of compacted red sand in laboratory test is close to that in field test. The logarithm of the permeability coefficient of red sand is positively correlated with the void ratio, and increases linearly with the increase of void ratio. The permeability coefficient of red sand can be estimated according to the void ratio in engineering construction. The permeability coefficient of red sand in natural state is about 10 times that of Malan loess, and the field test results are greater than the laboratory test results. Both red sand and Malan loess have horizontal infiltration and vertical infiltration, but the infiltration distance of red sand is larger than Malan loess. The infiltration process of red sand is mainly unsaturated, while that of Malan loess is mainly saturated. The research results can provide reference for engineering construction in red sand area.

【Key words】 Angolan; red sand; Malan loess; permeability coefficient

0 引言

安哥拉位于非洲西海岸, 浅地表发育一层棕红色粉砂, 具有与中国湿陷性黄土相似的工程特性, 表现为天然状态下可直立且强度较高, 但浸水后其强度降低并产生附加湿陷变形的特点^[1-4]。在湿陷性黄土

地区, 前人通过现场浸水试验和室内试验对黄土的湿陷特性和湿陷机理进行研究, 从黄土的地质成因、微观结构、孔隙特征、增湿减湿和结构性等方面获得大量成果, 很好地指导了中国湿陷性黄土地区的工程建设^[5-10]。

作者简介: 李 硕, 男, 1986 年生, 汉族, 陕西渭南人, 大学本科, 工程师, 主要从事特殊岩土性质研究与水利水电方面的工作。E-mail: litong35634@126.com

通讯作者: 乔建伟, 男, 1990 年生, 汉族, 安徽宿州人, 博士, 高级工程师, 注册土木工程师(岩土), 主要从事特殊岩土工程性质与地基处理技术的研究工作。E-mail: 15029207728@163.com

鉴于黄土湿陷机理的复杂性,目前国内尚未形成统一认识,但均认为其诱发因素是水的入渗及含水率的增加。安哥拉红砂具有与中国湿陷性黄土相似的水敏性和湿陷性,因此对比安哥拉红砂与中国湿陷性黄土的渗透特性,对揭示安哥拉红砂的湿陷机理和采取适宜的地基处理措施具有重要意义。

本次在安哥拉湿陷性红砂典型分布区选择试验场地,通过室内变水头渗透试验和现场双环注水试验,分别测试安哥拉天然红砂、击实红砂的渗透系数,对比湿陷性黄土渗透系数的已有研究成果,分析了不同试验方法和不同状态下红砂与黄土的渗透系数,探讨了红砂与黄土渗透系数的影响因素,研究了红砂与黄土渗透系数随时间的变化规律,可为红砂和黄土地区工程建设提供参考。

1 试验概况

1.1 试验场地土层的基本性质

红砂试验场地位于安哥拉罗安达省南部,地形平坦,地表有杂草和零星灌木,未受人类活动破坏。钻探揭示场地地层从上至下为:①表层土;②棕红色粉砂层;③杂色粉砂;④泥岩。由于②层粉砂是工程建设的主要持力层且湿陷性表现更充分,因此本次试验主要研究粉砂②层(以下简称红砂)的渗透特性。试验开始前通过钻探取样和室内试验测试了红砂的基本性质,结果如表1所示。

表1 试验场地红砂的基本物理性质指标

指标名称	含水率 w/%	干密度 $\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	饱和度 $S_r/\%$	孔隙比 e	湿陷系数 δ_s	自重湿陷 系数 δ_{zs}
最大值	8.6	1.79	41	0.734	0.051	0.038
最小值	3.7	1.54	12	0.492	0.003	0.001
平均值	5.9	1.66	26	0.608	0.020	0.014

1.2 试验方法与步骤

本次红砂②层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。

1.2.1 变水头渗透试验

试验参照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[11],分别测试天然红砂与重塑红砂的渗透系数。试验设备采用TST-55型渗透仪,试样直径61.8 mm、高40 mm。制备天然原状试样共14组,取土深度为1.0~8.1 m。制备击实土样9组,取土深度为1.0~8.1 m,击实土样的干密度变化范围为1.94~2.10 g/cm³,平均干密度为2.01 g/cm³;对应的孔隙比变化范围为0.271~0.376,平均孔隙比为0.328。每组红砂试样均开展两组平行试验。

1.2.2 现场双环注水试验

试验操作参照《水利水电工程注水试验规程》(SL345—2007)^[12],试验时将内外环压入地基土中5 cm,内外环中铺设5~10 mm厚砾石,采用量筒制作的马里奥特瓶(Mariotte bottle)控制外环和内环的水柱保持在地面以上10 cm,并量测注入内环的用水量。本次在天然红砂场地进行了10组试验(见图1a),在现场碾压的换填垫层上开展4组试验(见图1b)。试验开始前测试换填垫层压实红砂的基本物理性质,压实红砂的干密度的变化范围为1.92~1.95 g/cm³,孔隙比变化范围为0.369~0.391。



(a) 天然红砂现场双环注水试验



(b) 压实红砂现场双环注水试验

图1 现场双环注水试验图片

试验开始每隔5 min量测一次,连续量测5次;之后每隔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%时结束试验。渗透系数计算公式为:

$$k = \frac{QS}{F_0(Z+S+H_a)} \quad (1)$$

式中: F_0 为内环面积,cm²;Z为水头高度,取Z=10 cm; H_a 为试验土中的毛细压力值,大约等于毛细上升最大高度,对粉砂可取30 cm;S为从试坑底算起的渗入深度,cm。

2 试验结果与分析

2.1 室内试验结果与分析

变水头渗透试验测试天然红砂和击实红砂的渗透系数如图2所示。从图2可知,天然红砂渗透系数为 $1.42 \times 10^{-4} \sim 2.08 \times 10^{-3}$ cm/s,平均值为 9.65×10^{-3} cm/s,数量级为 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ cm/s,击实红砂渗透系数为 $2.10 \times 10^{-5} \sim 4.77 \times 10^{-4}$ cm/s,平均值为 1.62×10^{-4} cm/s,数量级为 $10^{-5} \sim 10^{-4}$ cm/s,约为天然红砂渗透系数的1/6,表明红砂经过击实后孔隙比减小,其渗透系数也相应减小。此外,天然红砂与重塑红砂渗透系数的对数均随孔隙比的增加而线性增加,分别可用2组线性函数拟合,其中天然红砂的渗透系数可用式(2)拟合,拟合优度 $R^2=0.9442$;重塑红砂的渗透系数可用式(3)拟合,拟合优度 $R^2=0.8771$ 。

$$\lg k = \frac{e - 1.2513}{0.2011} \quad (2)$$

$$\lg k = \frac{e - 0.6179}{0.0738} \quad (3)$$

式中: e 为土样孔隙比; k 为渗透系数,cm/s。

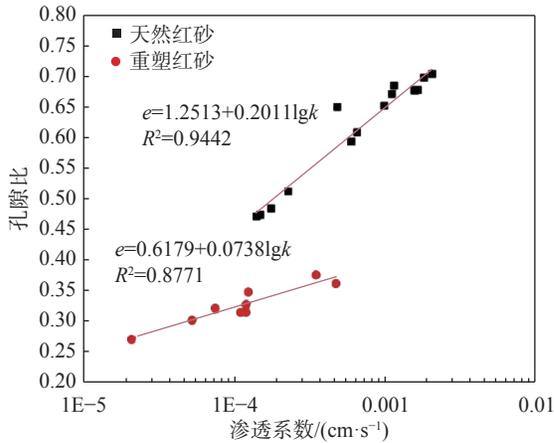


图2 室内试验获取红砂渗透系数与孔隙比关系图

2.2 现场试验结果与分析

现场双环注水试验测试天然红砂和压实红砂的渗透系数如图3所示。从图3可知,双环法测试红砂②层原状土的渗透系数为 $3.28 \times 10^{-3} \sim 1.20 \times 10^{-2}$ cm/s,平均值为 8.03×10^{-3} cm/s,数量级为 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ cm/s;双环法测试红砂换填压实土的渗透系数为 $6.85 \times 10^{-5} \sim 2.17 \times 10^{-4}$ cm/s,平均值为 1.47×10^{-4} cm/s,量级为 $10^{-5} \sim 10^{-4}$ cm/s。此外,现场试验获取天然红砂和压实红砂的渗透系数的对数均随孔隙比的增加而线性增加,其分别可用2组线性函数拟合,其中天然红砂的渗透系数可用式(4)拟合,拟合优度 $R^2=0.7733$;压实红砂的渗透系数可用式(5)拟合,拟合优度 $R^2=0.9375$ 。

$$\lg k = \frac{e - 0.5562}{0.0452} \quad (4)$$

$$\lg k = \frac{e - 1.1469}{0.2055} \quad (5)$$

式中: e 为土样孔隙比; k 为渗透系数,cm/s。

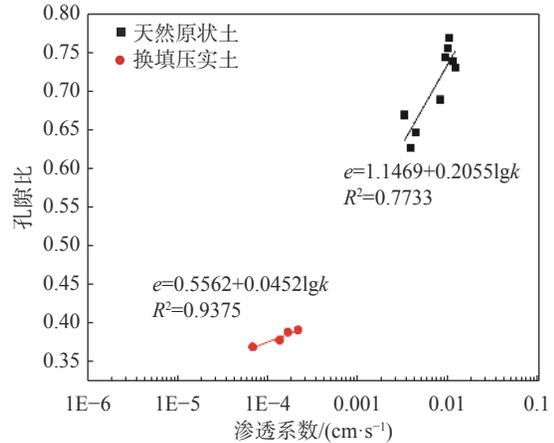


图3 现场试验获取的渗透系数与孔隙比关系图

2.3 室内试验与现场试验结果对比分析

对比现场试验和室内试验获取的天然红砂渗透系数可以发现,现场试验获取的渗透系数远大于室内试验获取的渗透系数,现场试验获取渗透系数的平均值是室内试验的约8倍。因此,对于天然红砂,根据室内试验评价其渗透系数时,应乘以相应调整系数。然而,室内试验和现场试验获取击实土的渗透系数相差较小,根据室内试验评价其渗透系数时,可直接取其测试结果。此外,对比图2和图3,发现现场试验获取天然红砂渗透系数与孔隙比拟合函数的拟合优度小于室内试验,然而,现场试验获取压实红砂渗透系数的拟合优度则大于室内试验,表明压实红砂的渗透系数与孔隙比相关性更好,据此推测结构性对天然红砂渗透系数有较大影响。因此,根据孔隙比评价天然红砂和压实红砂渗透系数时,可分别按式(4)和式(5)进行初步估算,但压实红砂估算结果可信度优于天然红砂。

3 红砂渗透特性与马兰黄土渗透特性对比分析

3.1 渗透系数

室内试验测试红砂渗透系数的数量级为 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ cm/s,现场试验测试红砂渗透系数的数量级为 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ cm/s;而王辉等^[13]通过室内试验测试马兰黄土渗透系数的数量级为 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ cm/s,杨仲康等^[14]通过现场试验测试马兰黄土渗透系数的数量级为 $10^{-3} \sim 10^{-5}$ cm/s。因此,对于红砂和黄土,其现场试验测试的渗透系数均大于室内试验测试结果,

且现场试验结果均约为室内试验结果 10 倍。对比相同试验方法下的渗透系数,发现安哥拉红砂的渗透系数均比中国马兰黄土渗透系数大一个数量级,表明红砂相对黄土具有较高的渗透性,其原因主要是颗粒组成的大小不同,如红砂以砂粒为主,而黄土以粉粒为主。

3.2 浸润范围

现场双环注水试验完成后,沿径向在水平方向及竖直方向间距 0.2 m 取样并测试含水量,根据测试结果绘制含水量增加等值线分布图和饱和度等值线分布图如图 4 所示。杨 华^[15]通过现场试验绘制了黄土入渗的浸润范围如图 5 所示。

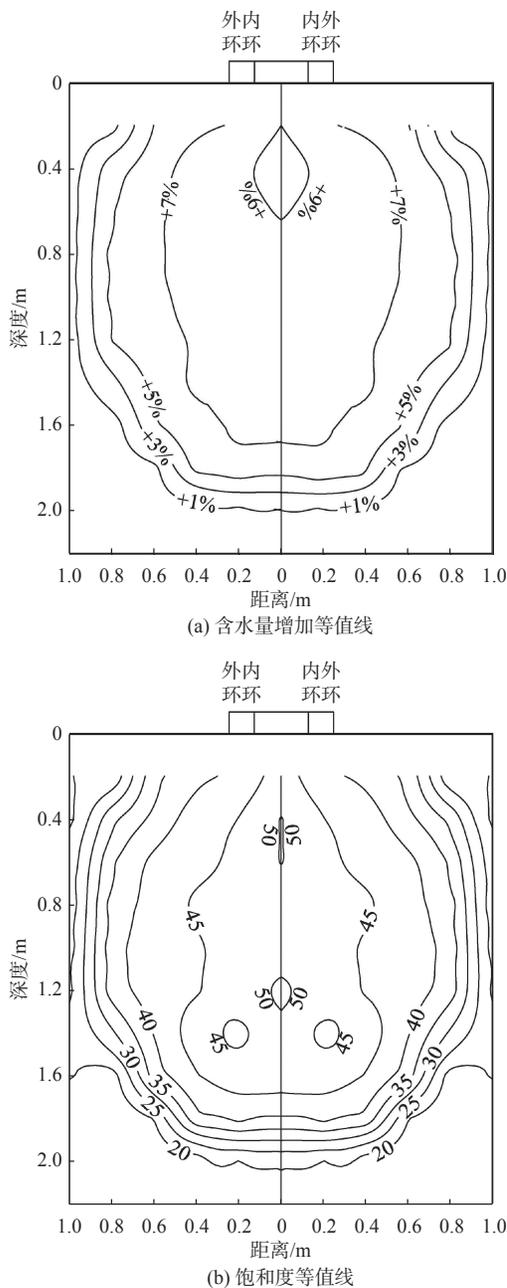


图 4 天然红砂的浸润范围

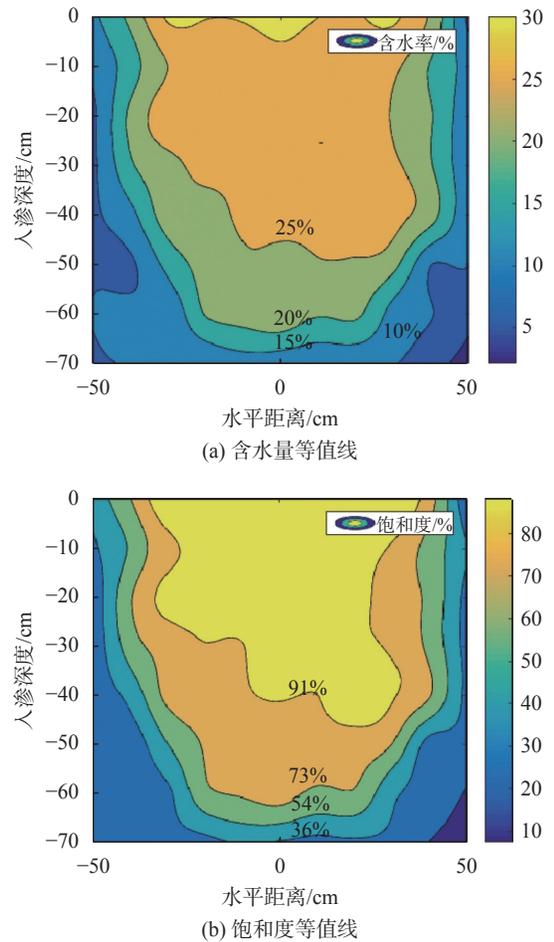


图 5 黄土入渗的浸润范围^[19]

对比图 4(a) 和图 5(a),发现红砂和黄土入渗过程中的渗透方向均存在水平入渗和竖直入渗,入渗浸润范围均是以内环为焦点的椭圆状,但红砂的水平入渗和竖直渗透距离均大于黄土的水平入渗和竖直渗透距离。入渗试验结束后红砂的水平最大入渗距离距外环 0.65 m,竖直最大入渗深度为 2 m;而马兰黄土的水平最大入渗距离距外环 0.14 m,竖直最大入渗深度为 0.65 m。对比图 3(b) 和图 4(b),发现水入渗过程红砂的含水量增加较少,其饱和度均不足 60%,表明红砂为非饱和入渗;而马兰黄土入渗过程中,土体含水量增加较多,最大饱和度大于 90%,表明马兰黄土为饱和入渗。

4 结论

(1)室内试验测试天然红砂渗透系数数量级为 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ cm/s,压实红砂渗透系数数量级为 $10^{-5} \sim 10^{-4}$ cm/s;现场试验测试天然红砂渗透系数数量级为 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ cm/s,压实红砂渗透系数数量级为 $10^{-5} \sim 10^{-4}$ cm/s。室内测试天然红砂渗透系数是现场试验测试结果的 1/8,室内试验测试压实红砂渗透系数与现场测试结果相近。

(2)红砂渗透系数的对数与孔隙比呈正相关关系,其随孔隙比增加而线性增加,工程建设中可根据孔隙比估算红砂渗透系数。

(3)天然状态下红砂渗透系数约为马兰黄土渗透系数的10倍,且现场试验结果均大于室内试验结果。

(4)入渗过程中红砂和马兰黄土均存在水平入渗和垂直入渗,但红砂的入渗距离大于马兰黄土。红砂入渗过程主要为非饱和渗透,而马兰黄土入渗过程主要为饱和渗透。

参 考 文 献

- [1] 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(S1): 121-126.
- [2] 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(S2): 332-337.
- [3] 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(S1): 136-140.
- [4] 刘争宏,于永堂,唐国艺,等. 安哥拉Quelo砂场地渗透特性试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(S2): 177-182.
- [5] 高国瑞. 中国黄土的微结构[J]. 科学通报, 1980, (20): 945-948.
- [6] 雷祥义. 中国黄土的孔隙类型与湿陷性[J]. 中国科学(B辑), 1987, (12): 1309-1318.
- [7] 苗天德. 湿陷性黄土的变形机理与本构关系[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(4): 383-387.
- [8] 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.
- [9] 陈正汉,刘祖典. 黄土的湿陷变形机制[J]. 岩土工程学报, 1986, 8(2): 1-12.
- [10] 郑建国,张苏民. 黄土的湿陷起始压力和起始含水量[J]. 工程勘察, 1989, (2): 6-10.
- [11] GB/T 50123—1999 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- [12] 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.
- [13] 王辉,岳祖润,叶朝良. 原状黄土及重塑黄土渗透特性的试验研究[J]. 石家庄铁道学院学报(自然科学版), 2009, 22(2): 20-22,31.
- [14] 杨仲康,陈冠,孟兴民,等. 基于现场渗透试验的黄土滑坡体入渗特性[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2017, 53(3): 285-291.
- [15] 杨华. 裂隙性黄土渗透特性试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2016.

收稿日期: 2021-09-23