

乔建伟,刘争宏,夏玉云,等.安哥拉红砂现场试坑浸水试验研究[J].地震工程学报,2024,46(3):521-528.DOI:10.20000/j.1000-0844.20220915002

QIAO Jianwei, LIU Zhenghong, XIA Yuyung, et al. Field immersion test on the Angora red sand[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2024, 46(3): 521-528. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20220915002

安哥拉红砂现场试坑浸水试验研究

乔建伟^{1,2,3}, 刘争宏^{1,3,4}, 夏玉云^{1,3}, 王冉^{1,3}, 唐立军^{1,3}

(1. 机械工业勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710043;

2. 自然资源部陕西西安地裂缝与地面沉降野外科学观测研究站, 陕西 西安 710054;

3. 陕西省特殊岩土性质与处理重点实验室, 陕西 西安 710043; 4. 长安大学地质工程系, 陕西 西安 710054)

摘要: 为准确评价安哥拉红砂场地的自重湿陷特征, 开展现场试坑浸水试验, 对地表及不同深度地层变形、水分入渗规律和浸水前后标贯击数进行监测与研究, 并对现场试验与室内试验结果差异性进行探讨。结果表明: 浸水后红砂地基表现为持续抬升, 变形曲线可分为陡升、缓升、不稳定和趋于稳定4个阶段; 深度8 m以上红砂地层为湿陷沉降变形, 累计沉降量为5.6 mm, 远小于室内试验计算的自重湿陷沉降量137 mm; 红砂竖向渗透速率和水平渗透速率均较大, 浸水和停水后红砂含水率变化较快, 红砂持水性较差, 浸水过程中红砂地层的饱和度小于80%, 为非饱和渗透; 浸水后红砂地层标贯击数显著降低, 具有显著的软化特性。红砂较大的渗透系数和较差的持水性导致红砂很难达到饱和状态, 是自重湿陷沉降量实测值远小于计算值的因素之一, 一般工程建设中建议可不考虑红砂地基的湿陷特性, 而将其按软化特性进行设计。研究结果不仅可指导红砂场地未来工程建设, 还可为其他砂土湿陷性评价提供借鉴。

关键词: 红砂; 试坑浸水; 渗透特性; 湿陷性; 软化性

中图分类号: P642; TU443

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2024)03-0521-08

DOI: 10.20000/j.1000-0844.20220915002

Field immersion test on the Angora red sand

QIAO Jianwei^{1,2,3}, LIU Zhenghong^{1,3,4}, XIA Yuyung^{1,3}, WANG Ran^{1,3}, TANG Lijun^{1,3}

(1. China Jikan Research Institute of Engineering Investigations and Design, Co., Ltd., Xi'an 710043, Shaanxi, China;

2. Field Scientific Observation and Research Station of Ground Fissure and Land Subsidence in Xi'an of Shaanxi, Ministry of Natural Resources, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

3. Shaanxi Key Laboratory for the Property and Treatment of Special Soil and Rock, Xi'an 710043, Shaanxi, China;

4. Department of Geological Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: To accurately evaluate the self-weight collapsibility characteristics of the Angora red sand site, a field immersion test for monitoring and studying the deformation of ground surface

收稿日期: 2022-09-15

基金项目: 陕西省创新能力支撑计划项目(2022-KJXX-05, 2023-CX-TD-34, 2023-CX-PT-46); 自然资源部陕西西安地裂缝与地面沉降野外科学观测研究站开放课题(2022-02); 国机集团青年科技基金重点项目(QNJJ-PY-2022-41, QNJJ-ZD-2022-17); 西安市英才计划青年项目(2022XAYC-03); CMEC科技孵化项目(CMEC-KJFH-2018-02); 自然资源部中国地质调查局项目(ZD20220203)

第一作者简介: 乔建伟(1990-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事工程地质和特殊岩土工程特性方面的研究工作。

E-mail: 15029207728@163.com。

通信作者: 刘争宏(1980-), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 长期从事特殊岩土工程性质与地基处理的研究工作。

E-mail: liu_zh2004@163.com。

and strata at different depths and water migration regularity was conducted. The standard penetration test (SPT) blow counts before and after immersion were determined, and the difference between the results field and indoor tests was discussed. Results indicate that after immersion, the ground surface of red sand shows continuous uplift deformation. The deformation curve can be divided into four stages: steep rise, slow rise, unstable, and stable. The red sand stratum with a depth of more than 8 m shows collapsible settlement deformation, with a cumulative collapsible settlement of 5.6 mm, which is far lower than the self-weight collapsible settlement calculated by the indoor test (137 mm). The vertical and horizontal permeability rates of red sand are large, and the water content of red sand changes rapidly after water immersion and water cut-off. The water holding capacity of red sand is poor. During water immersion, the saturation of red sand formation is less than 80%, which is unsaturated permeability. The SPT blow counts of red sand formation decrease considerably after water immersion, and softening characteristics are evident. The large permeability coefficient and poor water holding capacity of red sand impede the development of a saturation state, and thus, the measured value of the self-weight collapsible settlement is far lower than the calculated value. In general engineering construction, a design based on the softening characteristics of red sand foundation instead of collapsible characteristics is recommended. The results can not only guide engineering construction in red sand sites but also provide a reference for the collapsibility evaluation of other types of sand.

Keywords: red sand; immersion test; permeability characteristics; collapsibility; softening

0 引言

在撒哈拉沙漠以南的许多非洲西海岸国家浅层广泛发育一种红色的粉细砂(以下简称红砂),又称格埃路砂(Quelo),是多层建筑的主要持力层^[1-2]。随着“一带一路”倡议的持续推进,我国企业在红砂地区实施了大量的工程建设,在工程实践中发现该红砂在天然状态下具有较好的直立性和强度,其特殊处在于遇水软化和具有湿陷性^[3-4]。目前,我国研究学者和工程师采用室内试验、现场试验、数值模拟和理论分析对红砂的力学特性、渗透特性、承载特性和湿陷特性已开展了部分研究^[5-9],均认为红砂具有典型的水敏性并揭示了其渗透系数,研究结果有效解决了红砂地区的工程建设难题。

红砂表现出与中国黄土相似的湿陷性,根据《湿陷性黄土地区建筑规范》^[10],目前我国对黄土场地湿陷性的评价方法有室内压缩试验和现场试坑浸水试验^[11]。按室内压缩试验评价黄土湿陷性简便、省时、经济,但存在测试结果与现场实测值不一致的问题,不能真实反映黄土地基的湿陷性;现场试坑浸水试验可以确定自重湿陷量的实测值和分层湿陷量,可判定场地湿陷类型和自重湿陷下限深度,其结果准确可靠且能反映黄土地基的自重湿陷性^[12-17]。目

前,我国学者对红砂湿陷性的研究主要采用室内压缩试验,依据室内压缩试验结果并按我国《湿陷性黄土地区建筑规范》将其定义为自重湿陷性红砂^[1,9]。然而,一方面安哥拉红砂与中国黄土颗粒大小、矿物成分和地质环境存在较大差异,《湿陷性黄土地区建筑规范》在红砂地区的适用性有待验证;另一方面,由于室内试验土样的尺寸和受力状态不能与实际状态完全吻合,根据黄土湿陷性研究结果,需要对室内试验结果进行修正。

基于以上考虑,本文在安哥拉红砂地区开展现场试坑浸水试验,通过沉降观测点监测表水入渗过程中地表和不同深度地层的变形规律,利用水分计和室内试验分析表水的入渗规律和浸润范围,对比分析浸水前后红砂场地的标贯击数,揭示红砂地基的软化特征。研究结果可为红砂场地工程建设以及后期制定红砂地区建筑规范提供一定的参考。

1 试验概况

1.1 试验场地条件

本次现场试坑浸水试验在安哥拉罗安达平原实施,钻探揭示场地地层剖面如图1所示,地层自上至下依次为:①层耕植土,含有机质,呈浅棕红色,厚度0.5 m;②层粉砂,颜色较单一,以棕红色为主,厚度

8.3 m;③层粉砂,杂色,分③-1层粉砂和③-2层粉砂两个亚层;③-1层粉砂以灰白色为主,含黄色和棕色斑点,是②层和③-2层之间的过渡层,厚度 2.5 m;③-2层粉砂以灰白色粉砂为主,夹棕黄色和棕红色斑点,厚度 4.0 m;④层砂泥岩,砂岩以灰白色为主,一般含黄色和红色调斑点,未揭露最大厚度。自钻孔 Zk1 和 Zk2 顶部以 1 m 为间隔取样,测试不同红砂地层基本物理指标和自重湿陷系数,结果如表 1 所列。

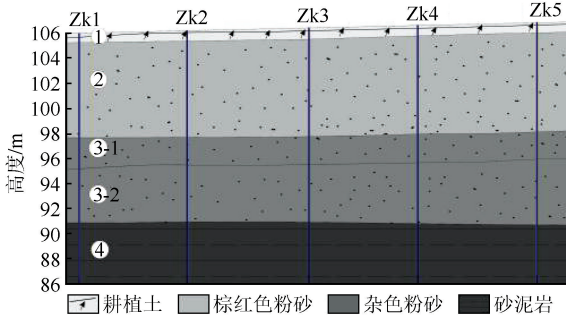


图 1 试验场地地层剖面图

Fig.1 Stratum profile of test site

表 1 试验场地红砂地层基本物理指标

Table 1 Basic physical indexes of red sand stratum in test site

层号与层名	②粉砂	③-1粉砂	③-2粉砂
含水率/%	5.9	6.1	7.8
干密度/(g/cm ³)	1.66	1.72	1.74
孔隙比	0.608	0.550	0.537
饱和度/%	26	30	39
自重湿陷系数	0.001~0.048	0.001~0.038	0.001~0.036

统计钻孔 Zk1 和 Zk2 中自重湿陷系数大于 0.015 的数值,按式(1)计算自重湿陷沉降量 Δ_{zs} ,并取经验系数 $\beta_0 = 1$,得到钻孔 Zk1 自重湿陷沉降量为 132 mm,钻孔 Zk2 自重湿陷沉降量为 141 mm,根据《湿陷性黄土地区建筑规范》判定该场地类型属于自重湿陷性场地。

$$\Delta_{zs} = \beta_0 \sum_{i=1}^n \delta_{zsi} h_i \quad (1)$$

式中: Δ_{zs} 为自重湿陷沉降量计算值; β_0 为经验系数; δ_{zs} 为自重湿陷系数; h_i 为第 i 层土的厚度。

1.2 试坑设计

考虑到试验场地湿陷性红砂厚度约为 15 m,设计浸水试验试坑为直径 16 m 的圆坑(图 2)。为消除上部耕植土的影响并控制试坑底部高程相等,确定试坑深度为 0.5~0.7 m,试坑开挖完成后安装监测仪器。为防止试坑周边土层坍塌,在试坑周边砌砖墙和水泥砂浆抹面防护,最后在试坑底部铺设 10 cm 厚碎石。

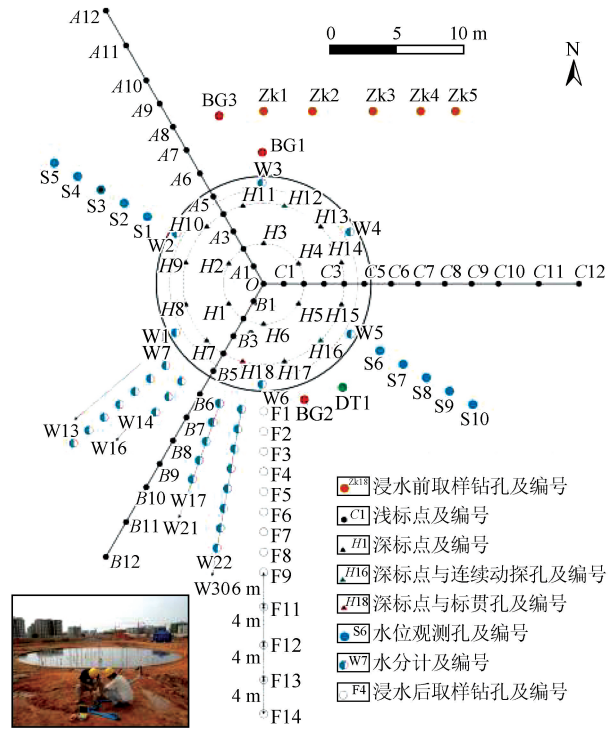


图 2 监测点编号示意图

Fig.2 Numbering plan of observing points

1.3 沉降标点布置与监测

本次试验在试坑内外布设地面沉降观测标点 37 个,其中 1 个布设在试坑圆心,为测点 O。另外 36 个以相同方式布设在互成 120° 夹角的 3 条测线上,每条测线 12 个标点。以测线 A 为例,5 个观测标点位于坑内,间距 1.5 m;7 个位于坑外,A5~A10 间距 2 m,A10~A12 间距 3 m,即最远处标点距试坑边缘 15.5 m,距试坑圆心 23.5 m[图 3(a)]。

深层土体沉降标点分 2 组布设(图 2):第 1 组标点布设在以试坑中心为圆心、半径为 3 m 的圆周上,共布设 6 个(H1~H6),埋设深度在试坑底以下 2~12 m,每间隔 2 m 布设 1 个;第 2 组布设在以试坑中心为圆心、半径为 6 m 的圆周上,共布设 12 个(H7~H18),埋设深度在试坑底以下 2~16 m,2~12 m 每间隔 2 m 布设 1 个,12~16 m 间隔 1 m 布设 1 个,以监测可能出现的湿陷下限深度,其中 13 m、15 m 各布设 1 个深标点,14 m、16 m 各布设 2 个深标点。

沉降标点变形监测采用瑞士产徕卡 NA2 型高精度精密水准仪与钢瓦水准尺,按二级变形测量精度要求进行监测。

1.4 土壤水分计与水位观测孔布置

本次试验在试坑内外布置土壤水分计 30 个,采

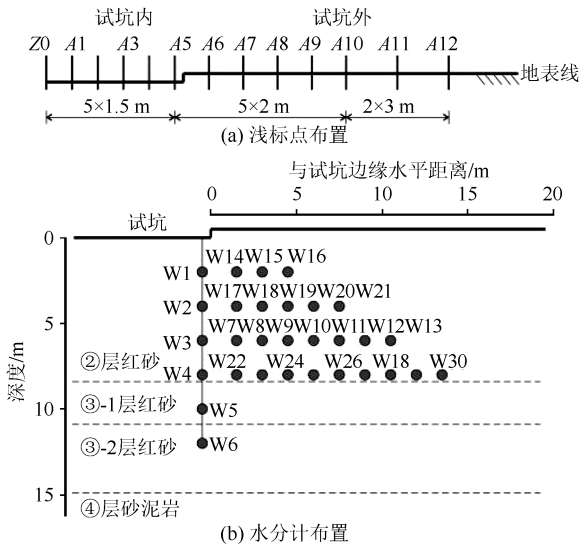


图3 浅标点与水分计布置剖面图

Fig.3 Sectional layout of shallow observation points and moisture meters

用长沙亿拓土木工程监测仪器有限公司生产的YT4801型土壤水分计,布置剖面如图3(b)所示。试坑内布置6个水分计(W1~W6),以试坑中心为圆心,布置在半径为7.5m的圆周上,相邻水分计深度间隔2m;W1位于试坑底部以下2m,W12位于试坑底部以下12m。试坑外浅标点布置在试坑西南侧B测线浅标点的两侧,共布置4排,水平上水分计与试坑距离为1.5~13.5m,竖向上水分计位于试坑底部以下2~8m。试坑内水分计用于监测试坑内表水向下的渗过过程,试坑外水分计用于监测表水的侧向渗透和浸润过程。水分计监测值为体积含水量,试验采用水分计的体积含水量与质量含水率为线性关系。

为监测浸水过程中红砂自由水位的变化特征,在试坑外对称布置2条水位观测剖面线。每条测线包括5个观测孔(S1~S5和S6~S10),试坑外第1个观测孔与试坑边缘水平距离为2m,相邻观测孔间距2m,各观测孔深度均为16m。水位观测孔采用钻机成孔后放入直径75mm的PVC管,PVC管与钻孔孔壁间隙用角砾填充。测量水位时采用米尺在PVC管内量测。

1.5 标准贯入试验

试坑浸水前在钻孔Zk3和Zk4开展标准贯入试验,试坑浸水后在钻孔BG1和BG2开展标准贯入试验。标贯试验重锤质量为63.5kg,从76cm的高度自由下落并击打插入土中的探头,测定探头贯入30cm所需的击数,试验步骤和技术要点按《岩土

工程勘察规范》^[18]实施。测试深度为地表下1m,并每间隔1m测试1次,测试最大深度为15m。

1.6 浸水试验过程

本次试验共历时258d,其中浸水前初值观测7d,浸水10d,停水后观测241d。试验累计向试坑注水3020m³,平均日注水量为302m³,注水过程中由于现场试验条件有限,导致试坑在部分阶段处于无水阶段。试坑无水时,上部红砂地层由于无水源补给会导致含水率降低,导致浅部水分计变化曲线不光滑,试验过程中尽可能减少试坑无水阶段的时间并准确记录无水时间,在此期间观察并记录水分计变化曲线。试验日注水量、累计注水量和有水时间段如图4所示。浸水过程中和停水后10d内,每天固定时间固定人员用精密水准仪对全部沉降观测点进行测量,停水后10~20d间隔3d观测1次,随后间隔10~35d观测1次。

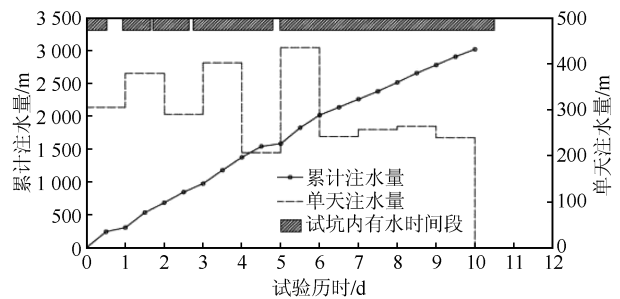


图4 试坑注水量变化曲线

Fig.4 Variation curve of water injection in test pit

2 试验结果与分析

2.1 地表变形

(1) 地表变形发展过程

试验过程中,各浅标点均产生不同程度的抬升变形且变形发展过程基本相同,以测线A为例,绘制测线A累计变形量变化曲线如图5所示。从图5可知,试验期间地表变形发展过程可分为4个阶段,即变形陡升阶段(ab段)、变形缓升阶段(bc段)、变形不稳定阶段(cd段)和变形趋于稳定阶段(de段)。①变形陡升阶段,发生在浸水期间,该阶段地表抬升速率较快,变形曲线表现为斜率较大的直线,地表最大累积抬升位移为6.3mm,平均抬升速率为0.63mm/d;②变形缓升阶段,为停水后0~20d,地表抬升速率逐渐减小,变形曲线表现为斜率逐渐减小的弧线,该阶段地表最大抬升位移为2.4mm,平均抬升速率为0.12mm/d;③变形不稳定阶段,为停水后20~80d,地表位移表现为间断的抬升和下降,

但整体表现为抬升变形,变形曲线为倾斜的锯齿线,该阶段红砂累积最大抬升量为 2.6 mm,平均抬升速率为 0.043 mm/d;④变形趋于稳定阶段,为停水后 80~241 d,地表变形仍表现为抬升,但变形量逐渐趋于稳定,变形曲线表现为斜率较小的直线,该阶段累计抬升位移为 2.8 mm,平均抬升速率 0.017 mm/d,约为浸水期间抬升速率的 1/37。

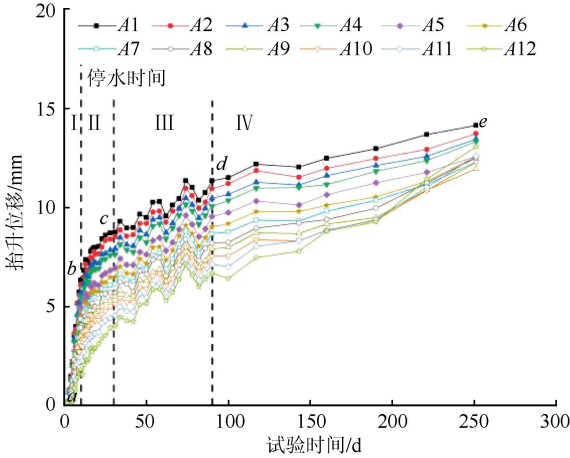


图 5 测线 A 浅标点累计变形曲线

Fig.5 Cumulative deformation curves of shallow observation points along line A

(2) 地表变形特征

绘制不同时间测线 A、C 变形剖面曲线如图 6 所示。从图 6 可知,试坑内外不同测点抬升位移存在差异,变形剖面线近似呈倒“V”字型,最大位移为试坑内测点 C5,累积抬升位移为 19.3 mm。试坑内位移整体大于试坑外位移,以测线 A 为例,试坑内测点抬升位移为 13.0~15.1 mm,试坑外测点抬升位移为 12.5~14.4 mm。试坑内外相邻测点差异变形量较小,最大差异变形量发生在测点 C7 和 C8 之间,相应的地表倾斜率为 1.03‰;试坑最外侧的测点 A12、B12 和 C12 也产生了显著的抬升变形,最大抬升位移分别为 14.4 mm、12.4 mm 和 15.7 mm。此外,试验过程中发现距试坑水平距离为 21 m 的基点也产生了明显抬升变形,表明浸水影响的水平距离较大,超过 21 m。

2.2 分层变形

绘制不同深度测点位移随时间变化曲线如图 7 所示。由图 7 可知,不同深度地层变形均表现为抬升,但变形曲线为锯齿形,即不同深度地层位移随深度变化曲线的斜率呈“正负交替”的现象。其中 8 m 以上地层抬升位移随深度增加而增加,表明②层粉砂地层位移为负值,即为湿陷沉降变形,计算获得试

验期间②层粉砂地层的累计湿陷沉降量为 5.6 mm; 8~12 m 内地层抬升位移随深度增加而减小,表明③-1 层粉砂地层位移为正值,即表现为膨胀抬升变形;12~15 m 内地层抬升位移随深度即有增加也有减小,表明③-1 层粉砂地层兼具膨胀抬升变形和湿陷沉降变形,但整体仍以膨胀变形为主;15 m 以下地层抬升位移随深度增加而减小,表明④层砂泥岩为膨胀抬升变形。此外,深度 15m 处④层砂泥岩顶部的抬升位移量与地表抬升位移量基本相同,表明红砂地基的抬升位移主要由下部砂泥岩膨胀抬升变形导致。

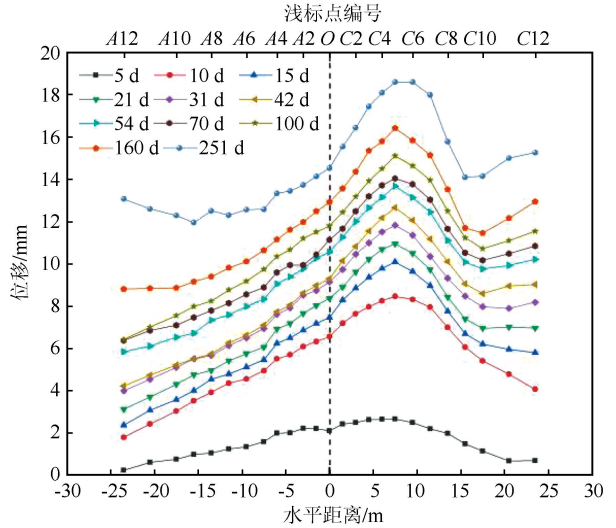


图 6 测线 A、C 变形剖面随时间变化曲线

Fig.6 Variation curves of deformation profile of survey line A, C with time

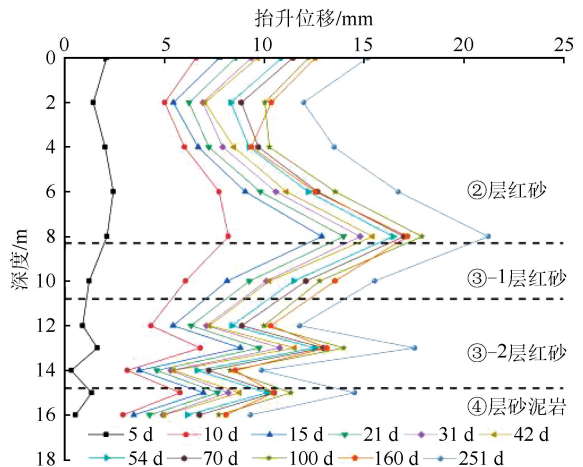


图 7 不同深度地层位移随时间变化曲线

Fig.7 Displacement curves of stratum at different depths with time

2.3 表水入渗规律

根据试坑外水分计监测结果和浸水完成后钻探取样测试结果,绘制浸水后不同时间浸润线如图 8

所示。由图8可知,浸水初期表水以垂直渗透为主,浸水1 d后,水的入渗深度即达8.5 m,平均竖向入渗速率为0.35 m/h(即 9.72×10^{-3} cm/s),水平入渗距离为1.9 m,平均水平渗透速率为0.079 m/h(即 1.31×10^{-3} cm/s)。但表水入渗至④层砂泥岩顶部时,由于其相对隔水作用,水的优势渗透逐渐变为水平渗透,浸水10 d后最终浸润线与水平线的夹角约为 24.4° 。

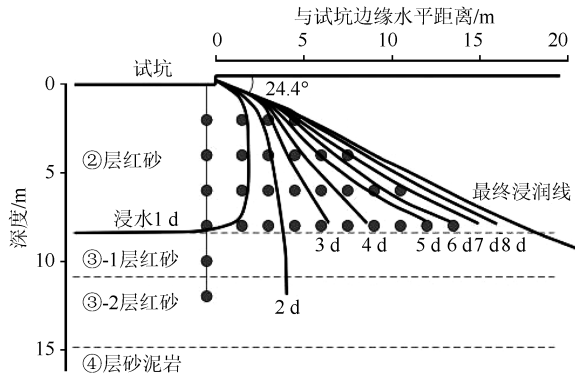


图8 浸水期间浸润线变化特征

Fig.8 Variation characteristics of phreatic line during water immersion

试验过程中试坑内外水分计表现出相同的变化规律,鉴于文章篇幅,本节主要介绍试坑内水分计变化规律,绘制试坑内水分计随时间变化曲线如图9所示。由图9可知,浸水后试坑内不同深度水分计的变化时间随深度增加而相对滞后,湿润锋到达后,水分计均为陡然增加,表明地层含水率增加速率较快,其在30 min内即增加至总量的80%。浸水后试坑内外②层红砂的最大含水率约为18%,对应饱和度约为79%,③-1和③-2层红砂的最大含水率为16%,对应饱和度分别约为78%和80%,表明红砂表水入渗为非饱和入渗。②层红砂上部(深度4 m)含水率变化曲线为锯齿形,表明试坑内间断供水对其影响较大,而③-1层红砂(深度8 m)和③-2层红砂(深度12 m)含水率受试坑内间断供水的影响较小。停水后试坑内不同深度红砂含水率变化曲线相对滞后,②层红砂上部(深度4 m)含水率在停水后两天即开始迅速减小,并长期维持在8%左右,③-1层红砂(深度8 m)含水率在停水后20 d开始下降,但下降速率小于②层红砂,③-2层红砂含水率变化曲线较平缓,含水率长期维持在14%左右。据此推测试验场地红砂地层上部地层持水性较差,浸水或强降雨期间表水在红砂地层中迅速下渗,导致红砂地层含水率迅速增加;但浸水或强降雨过后,上部红砂地层水分持续下渗导致其含水率也迅速降低。

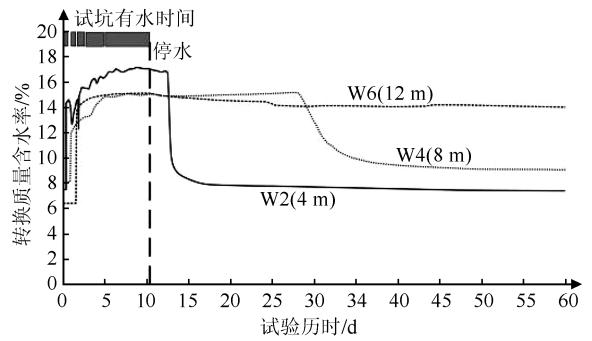


图9 试坑内水分计含水率变化曲线

Fig.9 Changing curves of water content of moisture meter in test pit

浸水后,试坑外不同位置水分计发生变化的顺序为:距试坑越近,埋深越大,含水率越先发生变化(增加);与试坑内水分计一样,试坑外水分计也表现为陡然增加,表明含水率增加较快。停水后,含水率降低的先后顺序为:距试坑越远,埋深越浅,含水率越先发生变化(减小),与试坑内水分计一样,停水后水分计变化较快,表明含水率降低也较快。

2.4 水位变化规律

试验过程中,试坑外水位监测孔表现出相同的变化规律,绘制S1~S5水位监测结果如图10所示。由图10可知,试坑内水位监测孔的水位均先后抬高,表现出与试坑距离越近,水位越早变化且水位越高的趋势。停水后,监测孔的水位先后降低并趋于一致,且长期位于③-2层红砂中形成上层滞水。

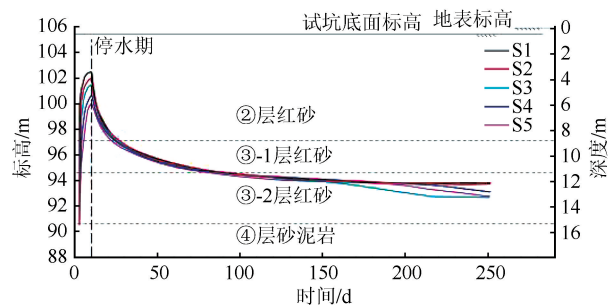


图10 试坑外监测孔水位变化曲线

Fig.10 Changing curves of water level of monitoring hole outside test pit

2.5 浸水前后标贯击数变化特征

绘制浸水前后试验场地标贯击数随深度变化曲线如图11所示。由图11可知,天然状态下红砂地基标贯击数随深度增加而增加,②层红砂的标贯击数平均值为5.7击,③-1层红砂标贯击数平均值为13击,③-2层红砂标贯击数平均值为28击;浸水后红砂地基标贯击数仍随深度增加而增加,但相同深度标贯

击数均相对减小,②层红砂的标贯击数平均值降低为 4 击,③-1 层红砂标贯击数平均值降低为 9 击,③-2 层红砂标贯击数平均值为 22.6 击。对比浸水前后标贯击数,发现红砂地基具有明显的软化特性,特别是②层红砂浸水后标贯击数平均值仅为 4 击,表明其浸水后力学性质较差;而③-2 层红砂浸水标贯击数平均值为 22.6 击,表明其仍具有较好的力学性质。

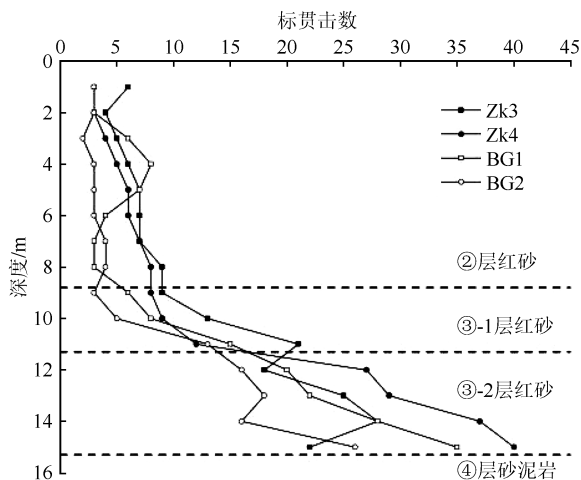


图 11 浸水前后标贯击数随深度变化

Fig.11 Change of SPT blow counts with depth before and after water immersion

2.6 红砂场地工程特性讨论

分析以上试验结果,可以得出浸水后仅②层红砂表现出湿陷沉降,但自重湿陷沉降量仅为 5.6 mm,远小于根据室内试验获得的红砂自重湿陷沉降量计算值 132 mm 和 140 mm,根据中国《湿陷性黄土地区建筑规范》可将试验场地定为非自重湿陷性红砂场地。浸水过程中红砂渗透速率较快且持水性差,导致红砂地层饱和度均不足 80%,未达到饱和状态;而我国湿陷性黄土浸水后试坑下部一定深度黄土层的最大饱和度均大于 90%^[19-20],达到了饱和状态。据此推测浸水过程中红砂地层未达到饱和状态是导致红砂场地自重湿陷沉降量实测值与室内试验计算值存在差异的因素之一。室内试验时红砂土样可达到饱和状态,土样能产生充分的湿陷变形,现场浸水试验红砂地层未达到饱和状态,导致地层不能产生充分的湿陷变形。浸水前后红砂场地标贯击数存在显著差异,表明红砂地基具有显著的软化特性。

夏玉云等^[9]通过室内试验和浸水载荷试验揭示了安哥拉红砂地基的湿陷系数,发现浸水载荷试验获得的湿陷系数是室内试验的 0.59 倍,具有湿陷性。乔建伟等^[21]通过室内试验认为红砂黏土矿物的存在是红砂具有湿陷性的内在因素,含水率增加后黏土矿

物联结作用的减弱是产生湿陷变形的的主要原因。现场试坑浸水试验结果表明红砂为非自重湿陷性红砂,但具有显著的软化特性,据此本文推测红砂的湿陷变形主要由浸水后承载力显著降低,地基失稳破坏引起的,与于永堂等^[5]通过直剪试验发现含水率增加后抗剪强度显著降低吻合,与彭友君等^[3]通过现场试验发现浸水后红砂地基承载力显著降低吻合。

综上,本文推测红砂地基的湿陷变形主要由浸水后承载力降低导致的地基失稳、变形引起的,建议一般工程建设可不考虑红砂地基的湿陷特性,而将其按软化特性进行设计。

3 结论

(1) 红砂场地浸水后表现为膨胀抬升变形,变形曲线由 4 段组成,变形速率随时间增加逐渐减小;试坑内抬升变形量整体大于试坑外,但相邻标点差异变形量小,地表最大倾斜率为 1.03‰。

(2) 红砂地基抬升变形主要由下覆砂泥岩的膨胀抬升变形导致,仅②层红砂出现湿陷沉降,但湿陷沉降量远小于室内试验计算值,因此判定红砂地基为非自重湿陷性红砂场地。

(3) 红砂竖向渗透速率和水平渗透速率均较大,浸水和停水后红砂含水率变化较快,红砂持水性较差,红砂最终浸润线与水平面夹角为 24.4°;浸水过程中红砂地层的饱和度小于 80%,为非饱和渗透。

(4) 红砂标贯击数随深度增加而增加,浸水前后红砂标贯击数变化较大,具有显著的软化特性。

(5) 红砂地基的湿陷变形主要是由浸水后承载力降低导致的地基失稳变形引起的,建议一般工程建设可不考虑红砂地基的湿陷特性,而将其按软化特性进行设计。

参考文献(References)

- [1] 刘争宏,廖彦宏,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 Zhengong, LIAO Yanhong, ZHANG Yushou. Preliminary study on physical and mechanical properties of Luanda sand [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(Suppl01): 121-126.
- [2] 刘智,祝伯学,唐国艺,等.安哥拉 Quelo 砂强夯法处理地基承载力试验研究[J].工程勘察,2018,46(12):16-20.
LIU Zhi, ZHU Boxue, TANG Guoyi, et al. Experimental study on bearing capacity of Angola Quelo sand foundation treated by using dynamic compaction method [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2018, 46(12): 16-20.
- [3] 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 Youjun, YUE Dong, PENG Bo, et al. Research on bearing capacity of Angola Quelo sand strata[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(Suppl02): 332-337.
- [4] 唐国艺, 刘智, 刘争宏, 等. 低能级强夯在安哥拉 Quelo 砂中的应用[J]. 岩土力学, 2019, 40(增刊 1): 203-209.
- TANG Guoyi, LIU Zhi, LIU Zhenghong, et al. Application of low-level dynamic compaction in Quelo sand in Angola[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(Suppl01): 203-209.
- [5] 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 Yongtang, ZHENG Jianguo, LIU Zhenghong. Experimental study on shear strength characteristics of Quelo sand in Angola[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(Suppl01): 136-140.
- [6] 刘争宏, 王华山, 周远强, 等. 安哥拉 Quelo 砂场地非饱和渗流试验与计算[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(4): 79-85, 93.
- LIU Zhenghong, WANG Huashan, ZHOU Yuanqiang, et al. Test and calculation of unsaturated seepage in the Angola Quelo sandy soil site[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(4): 79-85, 93.
- [7] 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(增刊 2): 177-182.
- LIU Zhenghong, YU Yongtang, TANG Guoyi, et al. Experimental study on permeability characteristics of Quelo sand site in Angola[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(Suppl02): 177-182.
- [8] 唐国艺, 唐立军, 刘智, 等. 安哥拉罗安达湿陷性砂的载荷试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(5): 108-113.
- TANG Guoyi, TANG Lijun, LIU Zhi, et al. Research on collapsible sand under plate load test in Luanda, Angola[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(5): 108-113.
- [9] 夏玉云, 乔建伟, 刘争宏, 等. 安哥拉红砂湿陷特征试验研究[J]. 工程勘察, 2022, 50(3): 1-6.
- XIA Yuyun, QIAO Jianwei, LIU Zhenghong, et al. Experimental study on collapse characteristics of Angora red sand[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2022, 50(3): 1-6.
- [10] 中华人民共和国行业标准. 湿陷性黄土地区建筑规范(GB 50025—2018)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- The State Standards of the People's Republic of China. Code for building construction in collapsible loess regions (GB 50025—2018) [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.
- [11] 武小鹏. 基于试坑浸水试验的大厚度黄土湿陷及渗透特性研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2016.
- WU Xiaopeng. Study on the characteristics of collapse and permeability of large thickness loess ground based on water immersion test[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016.
- [12] 苏忍, 张恒睿, 张稳军, 等. 兰州地铁大厚度湿陷性黄土地层的现场浸水试验研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(增刊 1): 186-193.
- SU Ren, ZHANG Hengrui, ZHANG Wenjun, et al. Immersion tests on self-weight collapsible loess site with large depth of Lanzhou metro line [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(Suppl01): 186-193.
- [13] AN P, ZHANG A J, XING Y C, et al. Experimental study on settling characteristics of thick self-weight collapsible loess in Xinjiang Ili region in China using field immersion test[J]. Soils and Foundations, 2018, 58(6): 1476-1491.
- [14] WANG L Q, SHAO S J, SHE F T. A new method for evaluating loess collapsibility and its application[J]. Engineering Geology, 2020, 264: 105376.
- [15] 邵生俊, 李骏, 李国良, 等. 大厚度自重湿陷黄土湿陷变形评价方法的研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(6): 965-978.
- SHAO Shengjun, LI Jun, LI Guoliang, et al. Evaluation method for self-weight collapsible deformation of large thickness loess foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(6): 965-978.
- [16] 姚志华, 黄雪峰, 陈正汉, 等. 关于黄土湿陷性评价和剩余湿陷量的新认识[J]. 岩土力学, 2014, 35(4): 998-1006.
- YAO Zhihua, HUANG Xuefeng, CHEN Zhenghan, et al. New recognition of collapsibility evaluation and remnant collapse of loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(4): 998-1006.
- [17] 王丽琴, 刘鑫, 王正, 等. 试样厚度对室内测定黄土湿陷性指标的影响[J]. 地震工程学报, 2021, 43(5): 1190-1196.
- WANG Liqin, LIU Xin, WANG Zheng, et al. Influence of specimen thickness on laboratory determination of loess collapsibility indexes[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021, 43(5): 1190-1196.
- [18] 中华人民共和国建设部. 岩土工程勘察规范: GB 50021—2001 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- Ministry of Construction of the People's Republic of China. Code for investigation of geotechnical engineering: GB 50021—2001 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004.
- [19] 姚志华, 黄雪峰, 陈正汉, 等. 兰州地区大厚度自重湿陷性黄土场地浸水试验综合观测研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(1): 65-74.
- YAO Zhihua, HUANG Xuefeng, CHEN Zhenghan, et al. Comprehensive soaking tests on self-weight collapse loess with heavy section in Lanzhou region[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(1): 65-74.
- [20] 杨华. 裂隙性黄土渗透特性试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2016.
- YANG Hua. Experimental research on the permeation properties of fissured loess[D]. Xi'an: Chang'an University, 2016.
- [21] 乔建伟, 夏玉云, 刘争宏, 等. 安哥拉红砂湿陷性影响因素试验研究[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(3): 93-97, 104.
- QIAO Jianwei, XIA Yuyun, LIU Zhenghong, et al. Experimental study on influencing factors of Angora red sand collapsibility[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2023, 40(3): 93-97, 104.