

引用格式：刘建磊，卫童瑶，惠寒斌，等，2024. 大厚度非连续湿陷性黄土浸水变形特征分析 [J]. 地质力学学报，30 (6)：921–932.

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023174

Citation: LIU J L, WEI T Y, HUI H B, et al., 2024. Analysis of soaking deformation characteristics of large-thickness discontinuous collapsible loess [J].

Journal of Geomechanics, 30 (6)：921–932. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023174

大厚度非连续湿陷性黄土浸水变形特征分析

刘建磊，卫童瑶，惠寒斌，姜耀飞

LIU Jianlei, WEI Tongyao, HUI Hanbin, JIANG Yaofei

黄河勘测规划设计研究院有限公司，河南 郑州 450003

Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, Henan, China

Analysis of soaking deformation characteristics of large-thickness discontinuous collapsible loess

Abstract: [Objective] The unique stratigraphic structure of the widely distributed discontinuous loess stratum in the Guanzhong Plain area of China results in significant differences between the indoor calculated values and field-measured values of the self-weight wetting amount for evaluating the foundation's wetting property. [Methods] Indoor wetting tests and large-scale test pit immersion tests were carried out on-site to compare the factors influencing the difference between on-site and indoor wetting amounts, with the loess stratum on the north bank of the Weihe River as the research object. [Results] The following results were obtained from the study: (1) The ratio of self-weight wet depressions between field and indoor test was less than 0.1. This discrepancy was due to the discontinuity and inhomogeneity of loess layers, sampling disturbances in indoor tests, and differing immersion conditions in field test. (2) The "layer bow effect" caused by the discontinuity of loess was the main reason for the difference between the indoor and field tests. This effect weakened upward-transmitted deformation, hindered downward-transmitted gravity stress, and caused discontinuity in the percolation process. (3) Stratification calculations for the four test sites showed that most of the gravitational self-wetting in the field tests occurred in the Qp^3 soil layer, while the Qp^2 loess layer showed large difference between the field-measured and indoor test values. Thus, the Qp^2 loess layer has little to no wetting effect. [Conclusion] The shape of the saturated zone range obtained through numerical simulation was consistent with the field test results, and the numerical simulation method was more advantageous for observing the experimental results. When calculating wet subsidence by self-weight, a stratification method based on the strata age can be used. For the Qp^3 stratum, the correction coefficient method specified in the guidelines was chosen, while the Qp^2 loess stratum was determined by an on-site pit immersion test. [Significance] The research methodology used in this study provides theoretical guidance for future engineering constructions on the Guanzhong Plain.

Keywords: collapsible loess; in-situ soaking test; characteristics of collapse deformation; loess-paleosol

摘要：非连续分布的黄土地层在中国关中平原地区广泛分布，由于其特殊的地层结构，在评价地基湿陷性时自重湿陷量的室内计算值与现场实测值有较大的差异。为此，文章以关中盆地渭河北岸黄土塬地层为研究对象，开展了室内湿陷性试验和现场大型试坑浸水试验，对比了现场与室内湿陷量差异的影响因素。同时在结合数值计算的基础上，分析了现场浸水试验的渗流特征。研究结果显示：场地现场试验和室内试验的自重湿陷量比值小于 0.1，产生此差异的原因包括黄土地层的非连续性和不均匀性、室内试验的取样扰动因素以及现场试验的浸水条件差异；黄土的非连续性形成的层拱效应是造成室内试验与现

基金项目：中国博士后面上基金项目（2021M691186）

This research is financially supported by the China Postdoctoral Science Foundation Project (Grant No. 2021M691186).

第一作者：刘建磊（1984—），男，高级工程师，主要从事黄土工程地质相关方面研究工作。Email: liujl@yrec.cn

通讯作者：卫童瑶（1997—），男，硕士，主要从事黄土地质灾害研究工作。Email: 1138018902@qq.com

收稿日期：2023-10-25；修回日期：2024-04-25；录用日期：2024-04-25；网络出版日期：2024-05-17；责任编辑：吴芳

场试验差异的主要原因,其削弱了部分向上传递的变形、阻碍了向下传递的自重应力,同时造成渗流过程的不连续;计算自重湿陷量时,可采用根据地层时代分层的计算方法,该方法可为该地区未来的工程建设提供理论指导。

关键词: 湿陷性黄土; 现场浸水试验; 湿陷变形特征; 黄土-古土壤

中图分类号: TU444; P642.13+1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616(2024)06-0921-12

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023174

0 引言

黄土是第四纪以来在长期自然地质作用下形成的堆积体,其沉积过程经历了 240 万年(彭建兵等, 2014; 冷艳秋, 2018)。受沉积环境与物源组成的影响,黄土具有多孔隙、欠压密和弱胶结的物理特征(邵生俊等, 2006; 孙萍等, 2016; 慕焕东等, 2017; 赵蒙等, 2022)。具有这种特征的黄土会在水、力作用下发生湿陷(陈正汉和刘祖典, 1986; 许领和戴福初, 2009; 范文等, 2022; 陈家乐等, 2024)。

关于黄土湿陷性的评价目前普遍采用室内土工试验和现场大型浸水试验这 2 种方法(Sloan and Kleeman, 1995; Krabbenhoft et al., 2005; 梁庆国等, 2018)。由于两者之间试验条件的不同导致试验结果存在差异,《湿陷性黄土地区建筑规范》中根据黄土工程地质分区推荐了一个区域修正系数 β_0 , 这一方法指导了大量的工程建设并得到了行业的肯定(武小鹏等, 2011; 王小军等, 2012; 王治军等, 2016; GB 50025-2018, 2018; 徐西久等, 2023; 张天林等, 2023)。然而对于一些具有特殊分布的黄土地层结构,如第四系中更新统(Qp²)中的黄土-古土壤地层呈交错分布时,规范中的修正系数在工程应用中具有较大的局限性。李大展等(1993)首次在 Qp² 非连续分布的黄土地层中进行了试验,发现自重湿陷量的现场实测值与室内计算值相差悬殊,其比值仅为 0.1。随后,一些学者也发现了非连续分布的黄土地层的室内试验结果和现场浸水试验结果有较大差异,甚至在部分场地的现场浸水试验没有发生沉降而室内试验得出该场地为自重湿陷场地($\Delta z_s > 70$ mm)的结果(石怀清, 2008; 邵生俊等, 2015; 赵金刚等, 2020)。由于该套黄土地层中间夹有湿陷性较弱的古土壤地层,常规的修正系数评价方法已经无法满足工程实际的要求。对于此,一些学者分析了产生此差异的原因,包括室内外试验应力路径、试验环境、浸水饱和度、取样代表性等因素(王延辉等, 2013; 李开超和王庆满, 2017)。周有禄等(2018)

认为黄土地层分布不连续时,非湿陷土层对湿陷土层的自重湿陷变形有抑制作用是造成试验结果差异的主要原因。郑建国等(2015)考虑到湿陷性土体单元分布的杂乱程度,认为当黄土体中湿陷土单元和非湿陷土单元分布越杂乱,这种抑制作用越明显,并在湿陷量计算公式中加入反映黄土湿陷分布不连续效应的系数,但其方法仍然需要在工程实践中总结经验数据。

随着黄河流域生态保护和高质量发展战略的实施,西北内陆水网优化配置及水系连通等涉水类工程项目将大规模推进。在关中平原地区修建引水调水工程将不可避免地遇到黄土湿陷性这一特殊的岩土工程问题。因此文章依托渭河北岸黄土塬区所开展的大型试坑浸水试验、室内试验和数值模拟等研究,对比了现场与室内湿陷量差异的影响因素,分析了现场浸水试验的渗流特征,以期为关中平原地区未来的工程建设提供理论指导。

1 试验概况

1.1 场地条件

试验场地位于陕西省咸阳市马嵬镇东北塬上,附近场地平坦,周边宽阔,现状均为农田,地面标高约 502.5 m。试验点位置地貌单元属于黄土台塬,黄土层厚度超过 50 m,南侧为渭河的二级阶地和一级阶地(图 1)。

场地上部土层为上更新统风积(Qp^{3eol})黄土层,厚 6~8 m,层底连续分布厚约 2~3 m 的古土壤;下部以中更新统风积(Qp^{2eol})黄土为主,厚度大于 20 m,在揭露深度范围内夹多层古土壤,土层的分层结果见图 2。地下水位埋深超过 40 m。

在场地附近开挖 2 个深度为 26 m 的探井,每个探井在井壁沿深度每米人工刻取 I 级土样 4 件,开展室内土样物理指标试验,其中湿陷性试验选取单线法,试验物理力学参数结果见表 1。

根据单线法试验得到自重湿陷系数,结合规范

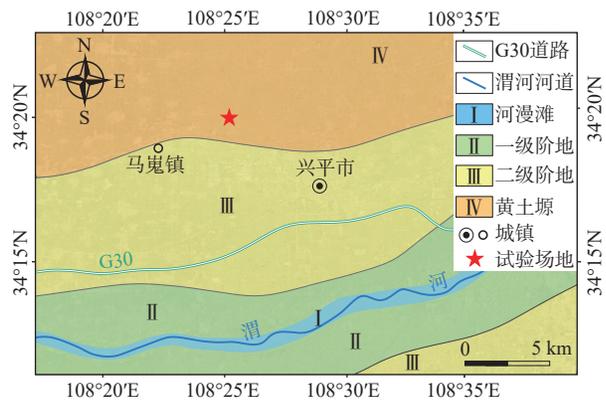


图 1 试验场地位置及地貌图

Fig. 1 Location and topography of the test site

表 1 试验场地黄土物理力学指标

Table 1 Loess physical index of the test site

取土深度/m	地层岩性	含水率/%	天然密度/(g·cm ⁻³)	孔隙比	自重湿陷系数	取土深度/m	地层岩性	含水率/%	天然密度/(g·cm ⁻³)	孔隙比	自重湿陷系数
1	Qp ³ 黄土	18.7	1.49	1.167	0.003	14	Qp ² 古土壤	8.9	1.44	1.049	0.051
2	Qp ³ 黄土	17.9	1.64	0.948	0.003	15	Qp ² 黄土	17.1	1.75	0.820	0.016
3	Qp ³ 黄土	16.2	1.43	1.202	0.009	16	Qp ² 黄土	19.7	1.76	0.850	0.020
4	Qp ³ 黄土	15.0	1.39	1.250	0.018	17	Qp ² 黄土	12.0	1.42	1.137	0.051
5	Qp ³ 黄土	10.9	1.41	1.131	0.041	18	Qp ² 古土壤	11.9	1.41	1.151	0.097
6	Qp ³ 黄土	11.3	1.40	1.154	0.057	19	Qp ² 古土壤	11.9	1.44	1.114	0.105
7	Qp ³ 古土壤	14.3	1.51	1.059	0.033	20	Qp ² 古土壤	11.3	1.44	1.095	0.081
8	Qp ² 黄土	10.1	1.52	0.963	0.017	21	Qp ² 黄土	11.6	1.54	0.964	0.041
9	Qp ² 黄土	11.0	1.42	1.118	0.040	22	Qp ² 黄土	20.6	1.68	0.945	0.023
10	Qp ² 黄土	12.1	1.46	1.081	0.024	23	Qp ² 黄土	23.3	1.68	0.989	0.021
11	Qp ² 黄土	15.0	1.68	0.855	0.011	24	Qp ² 古土壤	19.7	1.86	0.750	0.006
12	Qp ² 黄土	14.9	1.70	0.838	0.018	25	Qp ² 古土壤	18.3	1.79	0.798	0.010
13	Qp ² 古土壤	12.2	1.50	1.027	0.040	26	Qp ² 古土壤	19.1	1.84	0.761	0.008

的相关规定计算其总自重湿陷量,其中修正系数 β_0 值取 0.9,得到该场地自重湿陷量为 710.1 mm,自重湿陷下陷深度为 23 m(GB 50025—2018, 2018)。按以上结果判定,该场地属于自重湿陷场地,地基湿陷等级为 IV 级(很严重)。

1.2 试坑设计

根据室内试验结果,此次场地湿陷性土层的下限深度为 23 m,为了使试坑内地基土充分产生自重湿陷,并减少边界效应的影响,最后将试坑设计为圆形,直径为 30 m,深度 0.5 m(图 3)。注水采取在坑内自由流动的方式,为了防止长期冲刷的影响,在坑底铺设一层厚度为 10 cm 的透水砂砾石,粒径为 1~3 cm。在试验过程中,始终保持试坑内水的深度在 30~40 cm。



Qp³黄土—离石黄土; Qp²黄土—马兰黄土

图 2 试验场地土层剖面图

Fig. 2 Soil profile of the test site

考虑到场地内分布的多层古土壤对水分的渗透速度有较大影响,为了使地层快速饱和以及使土层充分发挥湿陷性,试验注水第 39 天停水之后在试坑内打设 28 个注水孔,孔径 127 mm,孔内用砂砾石填充,渗水孔的具体位置和深度见图 4。

1.3 沉降观测标点布置

试验共布设深、浅 2 种沉降观测标点,其中浅标点的作用为观测试验过程中场地地表的湿陷沉降量,深标点的作用为观测试坑内部不同深度土层的湿陷沉降量。浅标点在 3 条互为 120°的观测轴(A、B、C 轴)上布设,每条轴上除相交的端点外各布设 12 个观测点,试坑内测点的间距为 2.3 m,试坑外测点的间距为 2.0 m。同时沿 A 轴和 B 轴距坑边 14 m、18 m 处分别加设一个测点。浅标点埋设深度

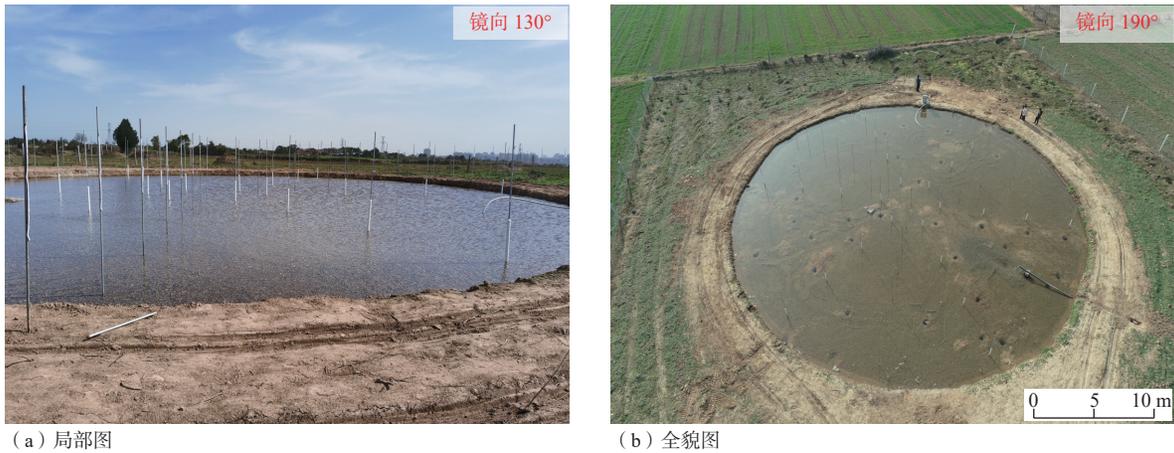


图 3 试坑浸水试验全景图

Fig. 3 Panoramic view of test pit immersion test

(a) Part view image; (b) Full view image

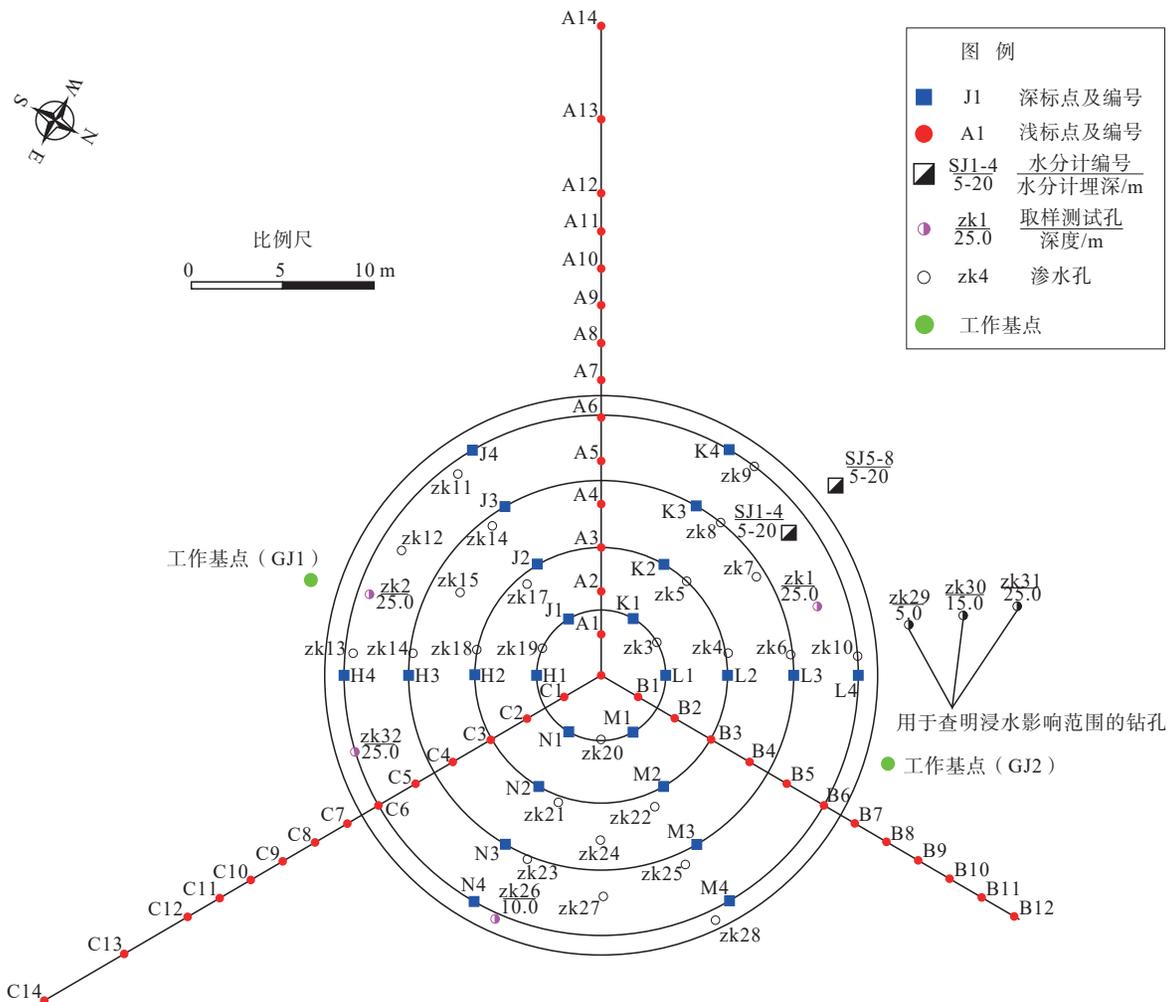


图 4 浸水试坑平面布置图

Fig. 4 Arrangement diagram of immersion test

在地面以下 1.0 m, 即坑底 0.5 m。3 条轴共埋设 40 个测点, 加上试坑中心的一个浅标点, 共 41 个浅标点。深标点均布置在试坑范围内, 观测深度在

0~24 m 之间, 埋设深度分别为 2.0 m、4.0 m、6.0 m、6.8 m、9.0 m、11.0 m、13.0 m、15.0 m、15.7 m、18.0 m、20.0 m、22.7 m、24.0 m, 每一深度布设 2 个深标点

(22.7 m、24.0 m 只布置了1个深标点),共计24个深标点。沉降标点的编号见图4。

1.4 水分传感器的布设

为了获得浸水过程中的含水量变化规律,在浸水试验前试坑内外各埋设4个水分计,深度分别为5 m、10 m、15 m、20 m。其中坑内水分计编号为SJ1—4,坑外水分计编号为SJ5—8。此次试验采用长沙亿拓土木工程检测仪器有限公司生产的远程自动化数据采集系统对水分计进行了自动化采集。

1.5 浸水试验过程

试验共历时67天,浸水过程可分为2个阶段,其中第1阶段注水共39天,从第1天到第8天的平均注水量达413 m³/天,此后注水量逐渐趋于稳定,基本上为260~350 m³/天。此后停水4天在试坑内打了28个渗水孔。第2阶段注水共历时9天,注水量平均值为1054 m³/天,最大单日注水量为1397 m³/天,可见在试坑内设置渗水孔之后,渗水量明显增大。在试验过程中试验人员每天固定时间对所有沉降监测标点进行监测记录,对当日的观测资料 and 结果及时进行统计、计算,并每3~5天对基准桩进行1次抄平。

2 试验结果分析

2.1 地表湿陷变形特征分析

试验过程中,场地内地表黄土在水的作用下不断发生沉降。以A系列浅标点为例,讨论地表在浸水过程中的沉降规律。如图5所示,Z0点在试坑中心,A1—A6点均在试坑内,A7—A10点在试坑外。

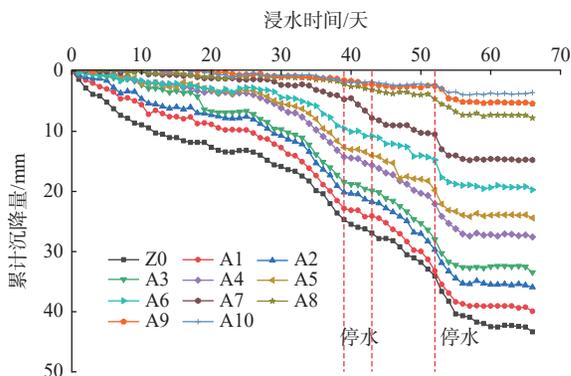


图5 试坑地表累计沉降量随时间的变化曲线

Fig. 5 Curves of cumulative settlement of test pit surface with time

试坑中心的Z0点沉降量最大,其值为43.3 mm。其余各监测点的值随着与中心点距离增加呈

减小趋势。这说明,距离试坑中心越远,土体在湿陷变形过程中受到侧边土的阻力越大,导致湿陷量越小。在2次浸水期间的沉降速度较为稳定,日均沉降量没有发生明显的变化,这与其他学者在大厚度湿陷性黄土场地所获得的试验结果有所差别(黄雪峰和杨校辉,2013;王庆满等,2022)。分析认为是因为此次试验的沉降量较小,单日沉降量均不到1 mm,其中第一阶段浸水前9天的日均沉降量为0.95 mm,第二阶段浸水的日均沉降量为0.89 mm。同时也说明了浸水孔并不能明显改变黄土的湿陷速度。在最终停水后,湿陷速率开始增加,前3天的平均沉降量超过1.5 mm,在该阶段,试坑内部土层中的自由水位逐渐下降,土的自重应力也随之增加,导致土体产生压缩变形。

2.2 深部湿陷变形特征分析

深部沉降量既能反映土体浸水入渗湿陷的过程,也可反映地面以下不同深度土层的湿陷量。由于每层土的湿陷性质是不一样的,所以各层湿陷下沉量也不相同。因此,深部沉降量对评价场地自重湿陷下限深度和工程构筑物地基设计的参数选取有重要意义。

各深标点沉降量绘制出其随深度的变化曲线如图6所示,横坐标为某一时间不同深度土层的累计湿陷沉降量。相邻2条曲线之间的间隔即为该段时间内黄土的湿陷量,间隔越大,则代表该段时间内黄土的湿陷速度越快。在最后一个时间段内,2条曲线的沉降量几乎相同,即表明土层达到稳定状态。

在水分不断下渗的过程中,深部土层不断向下湿陷变形,从而带动较浅位置的沉降标点也随之向下沉降。在图6中可呈现为,随着土层深度的增加,最终沉降量呈逐渐减小趋势,即地基土的分层沉降自上而下逐渐减小。经分析可知每个深标点测得的湿陷变形实际上是其下所有地层沉降累计的结果。由图6可见,深度11 m处测点(J2)的数值变为0,11 m则为现场实测的自重湿陷性土层下限深度。

2.3 地下水分扩散规律分析

水分计测点不同深度的体积含水率随时间变化过程如图7所示,其中图7a为试坑内测点,图7b的场地距试坑边缘3 m。在浸水之前,各测点的体积含水率在10%~20%之间,即为土体的初始含水率。浸水期间,湿润锋面逐渐到达测点位置,各水

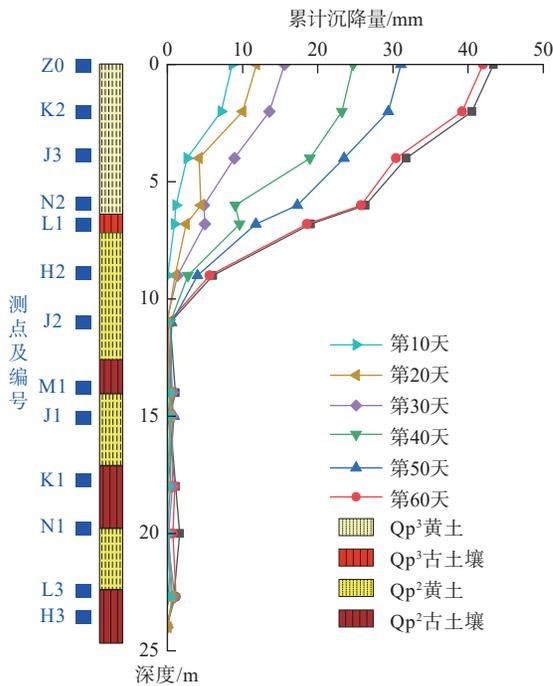
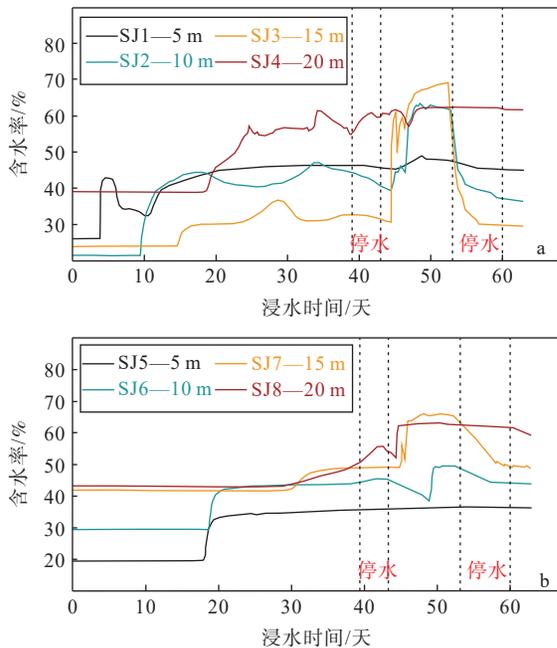


图6 土层累计沉降量随深度变化曲线
Fig. 6 Curves of cumulative soil settlement with depth

分计的读数依次从上到下开始发生明显变化,表现出水分垂直入渗的特点。



a—试坑内测点; b—试坑外3 m处测点
图7 不同深度体积含水率变化曲线
Fig. 7 Curves of volumetric water content at different depths
(a) Test points in test pit; (b) Test points at 3 m outside the test pit

可以看出图7b测点5 m深度处水分计读数在第18天后开始上升,比场地内测点(图7a)读数开

始上升的时间晚14天。同时10 m深度和5 m深度处的读数几乎同步上升。说明在试坑外,渗流途径主要为横向渗流,而横向渗流的速度要小于纵向渗流的速度。当土体含水率增加至饱和后,土体骨架结构遇水致使连接强度减弱而发生相互位移,土颗粒间结构失去稳定,滑移进入并充填孔隙,使得土体颗粒彼此之间连接的更加紧密,导致土体孔隙显著减小,此时土体体积含水率也会相应减小。

试验停水后,在试坑外北侧完成钻孔共3个,编号为ZK29、ZK30、ZK31,用于查明浸水影响范围,距试坑边的距离分别为2 m、5 m、8 m(图4),同时选取浸水前所打设的深标点钻孔L3作为对比。每个钻孔内均间隔0.5 m深度取扰动土样进行含水率及饱和度试验,通过对比浸水前后钻孔土样含水率变化来确定浸润区在空间上的扩散范围。可以发现,坑外2 m浸润区扩散范围为2 m深度以下的土层,坑外5 m浸润区扩散范围为10 m深度以下的土层,坑外8 m浸润区扩散范围为20 m深度以下的土层。可见浸润区的扩散范围随深度的增加而逐渐增大,在空间上呈倒置的“碗”状(图8)。

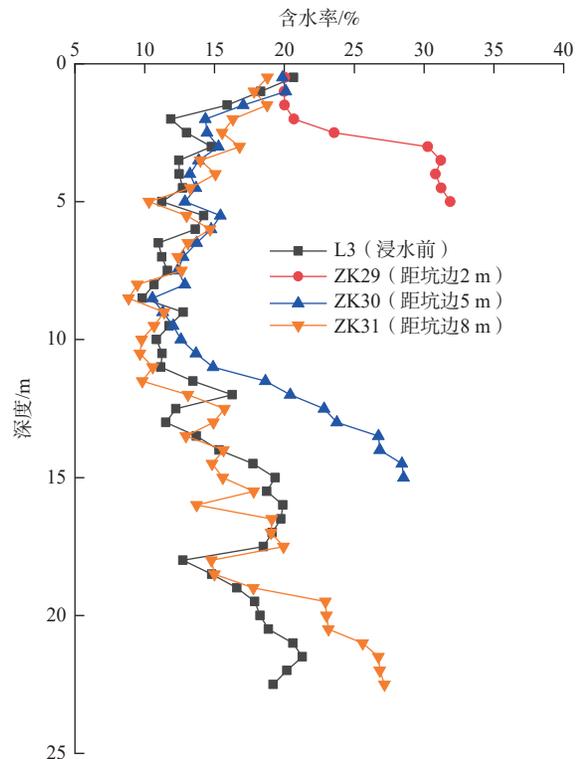


图8 浸水前后含水率对比图
Fig. 8 Comparison of moisture content before and after immersion

经过上述分析认为,场地内黄土地层的垂直入渗较快,侧向入渗较慢,土层综合垂直渗透系数约

为 6.9×10^{-4} cm/s, 综合水平渗透系数约为 2.3×10^{-4} cm/s。

3 非连续分布黄土湿陷变形计算分析

由于现场试验的水分入渗过程十分复杂, 现场布置的水分监测点很难具有代表性。因此, 为了进一步研究大厚度非连续湿陷性黄土地基内水分入渗的规律, 在通过大量室内外试验获得一些所需关键参数的基础上, 选用 GeoStudio 中的 SEEP/W 软件模块进行非连续湿陷性黄土地基内水分入渗规律模拟。

3.1 模型及计算参数

计算目的是为模拟水分在非连续分布的黄土地层内渗流规律, 主要地层包括古土壤和黄土, 并分别赋予不同的参数。模型建立时不考虑黄土地层不均匀性带来的影响, 假定黄土和古土壤层内物理力学指标一致。参考现场试验, 建立尺寸为 $60 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 的地基模型, 其中浸水坑的尺寸与现场相同, 直径 30 m , 深度为 0.5 m (图 9)。模型网格单元为四节点正方形, 尺寸均为 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 。模型上部浸水试坑范围内保持高度为 0.5 m 的压力水头, 其他部位均设为不透水边界模型计算时间为 50 天。计算参数根据前文的现场试验和室内试验结果获取, 具体值见表 2。

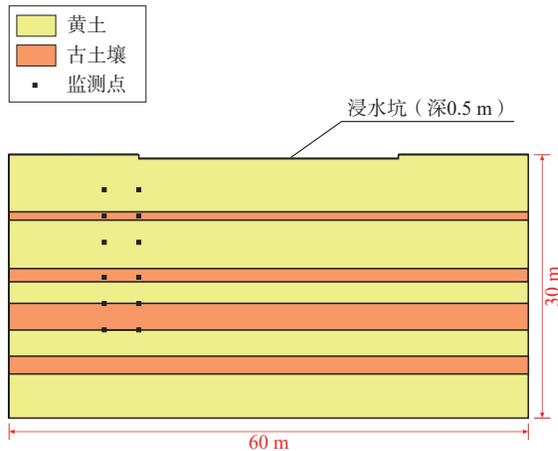


图 9 数值计算模型图

Fig. 9 Picture of numerical calculation model

表 2 数值模拟参数统计表

Table 2 Statistics of the numerical simulation parameters

材料介质	水平渗透系数/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	竖直渗透系数/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
黄土	2.3×10^{-4}	6.9×10^{-4}
古土壤	1.4×10^{-4}	4.0×10^{-4}

3.2 模拟计算结果

在入渗初期, 浸润锋面自上而下发展, 该阶段

以垂直入渗为主, 水平方向上的入渗并不明显。入渗 10 天、30 天时, 入渗深度分别 7.9 m 、 20.5 m (图 10)。随着浸水时间的延长, 竖向浸湿范围不断加深, 此时水平方向上的扩散速率开始缓慢进行, 在宏观上表现为水平方向上的扩散晚于竖直方向。

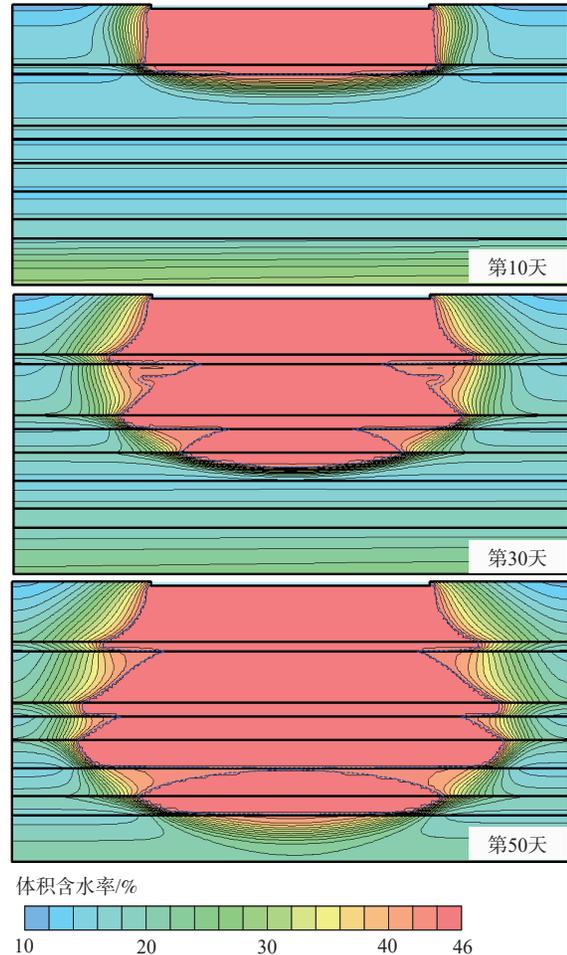


图 10 不同浸水时间体积含水率瞬态分布图

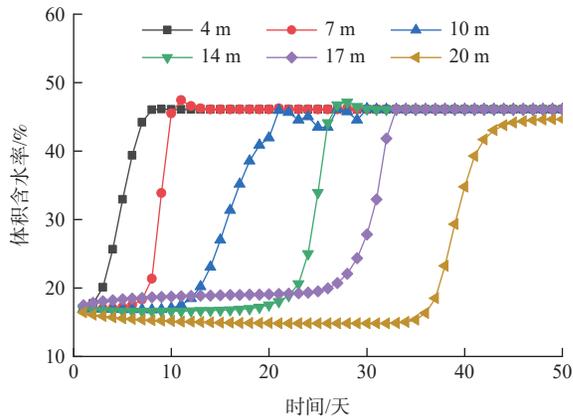
Fig. 10 Transient distribution of volumetric water content at different immersion times

可以发现, 在浸润锋面从古土壤层中进入黄土层中后, 会在黄土层上部留下一个非饱和区, 这是因为黄土的渗透系数大于古土壤, 在水分从古土壤层中进入黄土层中后, 渗流速度突然加快, 而后续水分的渗流跟不上, 造成该区域的体积含水量略微降低。随着渗流的进行, 浸润锋面进入下一个渗透系数较低的古土壤层中, 非饱和区在竖直方向上会逐渐尖灭并向两侧发展。最终侧向的浸润边界表现为在黄土层向两侧扩展, 在古土壤层向中间收缩。

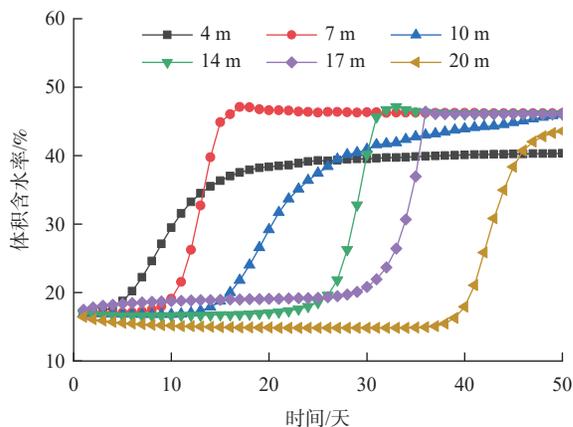
在模型计算时设置 12 个监测点, 如图 9 所示, 将在试坑边缘处的 6 个测点命名为探井 1, 试坑外 3 m 处同一位置的 6 个测点命名为探井 2, 测点距地表

深度分别为 4 m、7 m、10 m、14 m、17 m、20 m。

各个测点的体积含水率均经历了稳定-快速增长-维持稳定 3 个阶段(图 11)。水分到达测点时,土体在短时间内快速饱和,因此曲线处表现出快速上升的特点,此后体积含水率达到峰值并基本保持不变(11a)。根据体积含水率随时间变化曲线可以看出探井 2 中各个测点的含水率上升均滞后于相同深度处探井 1 中的测点(图 11b),这说明试坑外的土体以水平方向上的渗流补给为主。在 4 m 深度处,试坑外测点呈现出缓慢上升的趋势,且最终未达到饱和状态。由于浸润线的影响范围随着深度的增加而增加,在试验结束后,该点仍在浸润线的范围以外,所以测点处仍为非饱和土体。在 10 m 深度处,试坑内外 2 个测点的含水率上升速度均比其他深度缓慢。这是因为上部的古土壤层渗透系数较低,向该点处的补给速度小于下渗的速度,因此体积含水量的上升速度也较慢。



(a) 探井1不同深度监测点



(b) 探井2不同深度监测点

图 11 体积含水率随时间变化曲线

Fig. 11 Curves of volumetric moisture content versus time

(a) Monitoring points at different depths in exploratory well 1; (b) Monitoring points at different depths in exploratory well 2

总体来看,数值模拟所得饱和区范围的形状与现场试验结果基本一致,呈倒“碗”形或喇叭形,且在水分到达测点时,均出现快速饱和的特征。数值模拟则可以更直观的看到土层分布不连续对试验结果的影响,饱和范围的边界线为锯齿状,即古土壤下部土层易出现非饱和区,同时也表现为水分在层间渗流的不连续。

4 试验结果讨论

4.1 室内试验与现场试验差异原因分析

根据前文结果,自重湿陷量的现场试验测值为 43.3 mm,远小于室内试验计算值的 710.1 mm。同时现场自重湿陷性土层下限深度为 11 m,而室内所得下陷深度为 23 m。分析认为造成巨大差异的原因如下。

(1)特殊的地层结构形成层拱效应。此次试验场地下面分布有多层古土壤,属于渭河黄土塬区典型的非连续黄土地层。由于古土壤形成时具有特殊的气候条件和沉积环境,使其具有黏粒含量高、渗透系数低、力学强度高和湿陷性较弱的特点(Kyuma et al., 1984; 李滨, 2009; 鲁洁, 2020; 蔡琳等, 2021; 王志强, 2022)。

古土壤的渗透系数较低,在试验过程中会形成相对隔水层,阻碍了水分继续向下渗透。在渗流过程中具有自重湿陷性的土单元会发生湿陷变形,此变形会逐渐向上传递在地表土层形成累计变形。然而对于此次试验黄土与古土壤交错分布的地层,湿陷性较弱的古土壤削弱了部分变形的传递,导致部分黄土层之间非连续接触。同时土体中向下传递的自重应力也会受到古土壤层的阻碍,所以下部湿陷性土体的实际受力要小于室内试验中土样所承受的压力。此时黄土-古土壤的多层组合结构产生层拱效应,使水分、力和变形在垂直方向上的传递均受到了影响,场地内的各层黄土形成了相对独立的湿陷体系。然而在计算室内试验的自重湿陷量时无法考虑这些因素对黄土湿陷变形产生的影响。因此非连续湿陷性黄土地层形成的层拱效应是造成室内试验与现场试验差异的主要原因。

(2)黄土地层不均匀性。由于黄土沉积环境复杂,加之 Qp^3 马兰黄土中垂直裂隙和虫孔发育,造成黄土层面上的不均匀性,因此试验结果有较大的离

散性(王延辉等, 2013)。为了说明地层不均匀对试验结果的影响, 在试验场地附近具有相同地层结构的场地打设了 7 个探井, 分层取样并做室内自重湿陷试验, 结果如图 12 所示。可以发现, 在 20 m 深度以上的土样中, 自重湿陷系数呈离散分布, 并没有集中在某一个值附近。因此说明, 由于黄土地层分布不均导致的室内的土样不具有广泛代表性也会

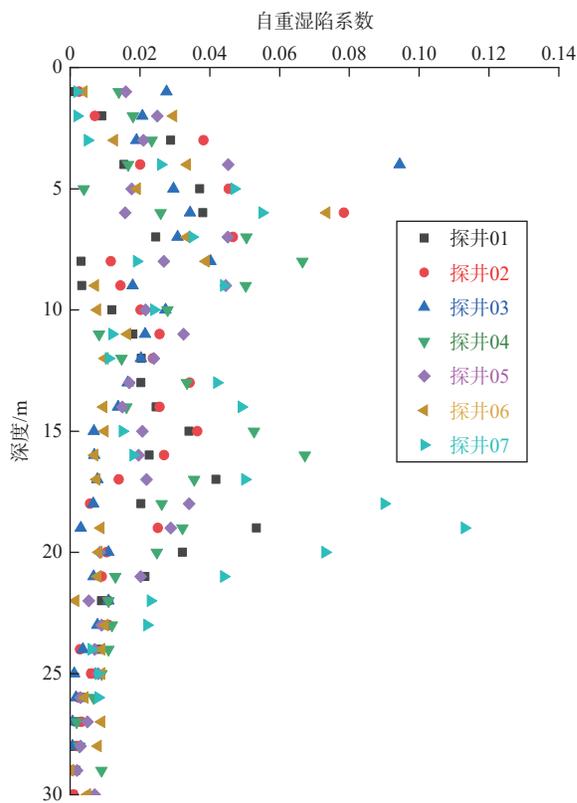


图 12 自重湿陷系数随深度变化散点图
Fig. 12 Scatter diagram of self-weight wetting coefficient versus depth

导致室内与现场试验结果的差异。

(3) 取样扰动因素。现场浸水试验为完全未扰动的原状土体, 尽管室内试验严格按照标准取 I 级不扰动样, 由于先期固结压力的存在, 在土样取出后必然会有一个应力释放的过程。土样的应力释放会引起孔隙率增加, 宏观上表现为土的膨胀, 因此室内试验所得的自重湿陷量计算值也必然偏大。此时取土深度越深, 两者的偏差越大。根据自重湿陷系数随深度变化散点图可以看出室内试验 15~20 m 深度的土层仍具有较强的湿陷性, 而在现场浸水试验中同一深度的土层已无湿陷变形(图 12)。

(4) 浸水条件差异。由于土层分布在竖直方向上的不连续性和水平方向上的不均匀性, 加之垂直节理发育, 大孔隙等特点。在现场试验中, 容易存在局部土体未充分饱和的现象, 但是在室内土工试验进行时的土样是充分饱和的。所以现场试验土体所受的自重压力小于室内试验的压力, 从而造成室内湿陷性系数偏大。

4.2 自重湿陷量的确定

根据前文分析结果, 层拱效应是造成室内试验与现场试验差异的主要原因, 其影响范围为古土壤下部的地层, 即 Qp^2 土层; 下部的 Qp^2 土层在室内试验时因取样扰动受到的影响也比上部的土层相对较大。可以发现不同地层时代的土层若采用相同的修正系数会造成较大的误差, 因此文章将从不同土层时代的角度分析沉降量。

根据选取的关中平原地区其他试验场地的结果进行对比(表 3), 不难看出, 现场试验的自重湿陷量大部分都发生在 Qp^3 土层中, 2 个时代土层的沉降量差值均超过 10 倍。对于 Qp^2 黄土, 现场实测值

表 3 考虑地层时代的修正系数 β 值

Table 3 Values of correction factor β considering stratigraphic age

序号	地层时代	土层厚度 /m	现场实测值 /mm	室内试验值 /mm	修正系数 β	数据来源
1	Qp^3	7.0	32.3	154.0	0.21	文中试验场地
	Qp^2	16.0	11.0	556.1	0.02	
2	Qp^3	16.5	181.7	177.0	1.03	西安市东郊泾河西岸(王庆满等, 2022)
	Qp^2	10.0	27.0	351.0	0.08	
3	Qp^3	15.2	285.4	268.0	1.07	西安地铁6号线项目田家湾站(王庆满等, 2022)
	Qp^2	3.3	0	36.0	0	
4	Qp^3	10.0	380.5	179.0	1.91	西安城际铁路项目咸阳机场附近(杨喆等, 2022)
	Qp^2	9.0	0	129.0	0	

注: β 为现场实测值与室内试验值得比值

与室内试验值有较大的差别,目前普遍认为 Qp^2 黄土地层具有轻微湿陷性或不具湿陷性(李大展等,1993;石怀清,2008),显然继续选取室内试验的计算值不能反映实际情况。其中2号试验场地在 Qp^3 土层中两个实验的沉降量基本一致,在 Qp^2 土层中现场实测值不到室内试验值的10%,3号和4号场地在 Qp^3 土层中现场实测值大于室内试验值,而在 Qp^2 土层中现场实测值却均为0,这些均进一步说明了 Qp^2 和 Qp^3 土层沉降差异很大。因此认为在计算自重湿陷量时需进行分层计算,在 Qp^3 地层中选用规范中修正系数的方法,对 Qp^2 黄土地层采用现场试坑浸水试验确定。

Qp^2 的黄土-古土壤系列地层在渭河北岸普遍分布且通常埋深较浅,该类地层表现出的湿陷性与 Qp^3 土层有较大差异,规范中的方法显然不能满足实际的需要。分层计算的方法较好的解决了这一问题,但 Qp^3 土层中修正系数值的选取在不同的场地中有较大的差异,这需要大量的现场试验实测数据提供科学依据。

5 结论

通过在大厚度非连续湿陷性黄土地层中开展了大型试验和室内自重湿陷性试验,分析其湿陷变形特征,文章得出以下认识。

(1)现场试验的自重湿陷沉降量为43.3 mm,而室内试验值为710.1 mm,前者与后者的比值小于0.1。造成差异的主要原因是黄土地层在竖直方向上的非连续性和在水平方向上的不均匀性,其次为室内试验的取样扰动因素和现场试验的浸水条件差异。

(2)数值模拟所得饱和区范围的形状与现场试验结果基本一致,呈倒“碗”形或喇叭形,且在水分到达测点时,均出现快速饱和的特征。在处理复杂土体的非饱和入渗问题时,数值模拟方法可以更直观的看到任意时刻的浸水影响范围以及各个部位的含水率分布情况。

(3)在计算自重湿陷量时需进行分层计算,在 Qp^3 地层中选用规范中修正系数的方法,对 Qp^2 黄土地层采用现场试坑浸水试验确定。该方法针对渭河北岸的黄土地层湿陷性评价具有较大的适用性,修正系数值的选取需在以后大量的工程实测数据和科学研究的基础上尽快修正完善。

References

- CHEN J L, NI W K, WANG H M, et al. 2024. Correlation between soil-water characteristic curves and wet subsidence of in situ loess[J]. Chinese Journal of Geologic Hazards and Prevention, 35(02): 107-114. (in Chinese with English abstract)
- CHEN Z H, LIU Z D, 1986. Mechanism of collapsible deformation of loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 8(2): 1-12. (in Chinese with English abstract)
- FAN W, WEI Y N, YU B, et al., 2022. Research progress and prospect of loess collapsible mechanism in micro-level[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 49(5): 144-156. (in Chinese with English abstract)
- HUANG X F, YANG X H, 2013. A study progress on in-situ soaking test on collapsible loess[J]. Rock and soil Mechanics, 34(S2): 222-228. (in Chinese with English abstract)
- KRABBENHOFT K, LYAMIN A V, HJIAJ M, et al., 2005. A new discontinuous upper bound limit analysis formulation[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 63(7): 1069-1088.
- KYUMA K, WANG Y Y, TULAPHITAK T, et al., 1984. Paleosols in Luochuan loess section[M]//SASAJIMA S, WANG Y Y. The recent research of loess in China. Kyoto: Kyoto Institute of Natural History.
- LENG Y Q, 2018. Study on the water-sensitive characteristics and disasters of loess[D]. Xi'an: Chang'an University. (in Chinese with English abstract)
- LI B, 2009. Research on formation evolution mechanism of multiple rotational loess landslides[D]. Xi'an: Chang'an University. (in Chinese with English abstract)
- LI D Z, HE Y H, SUI G X, 1993. Study and test on immersion of Q_2 loess in Large area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 15(2): 1-11. (in Chinese with English abstract)
- LI K C, WANG Q M, 2017. Discussion on the causes of the discrepancy between the internal and external test values of self-weight loess collapsibility content[J]. Shanxi Architecture, 43(3): 47-48. (in Chinese with English abstract)
- LIANG Q G, FANG J, ZHANG J D, et al., 2018. In-situ soaking test on the disturbed loess site at Lanzhou metro, Gansu province, China[J]. Journal of Geomechanics, 24(6): 803-812. (in Chinese with English abstract)
- LU J, 2020. Study on engineering characteristics of loess-paleosol[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology. (in Chinese with English abstract)
- MU H D, SUN P, LI R J, et al., 2017. Dynamic damping characteristics and evolution law of Pan'an structural loess[J]. Journal of Geomechanics, 23(6): 935-942. (in Chinese with English abstract)
- National Standard of the People's Republic of China. 2018. Building code for wet subsided loess areas (GB50025-2018) [S]. Beijing: China Construction Industry Press. (in Chinese)
- PENG J B, LIN H Z, WANG Q Y, et al., 2014. The critical issues and creative concepts in mitigation research of loess geological hazards[J]. Journal of Engineering Geology, 22(4): 684-691. (in Chinese with English ab-

- stract)
- QI L, QIAO Y S, LIU Z X, et al., 2021. Geochemical characteristics of the Tertiary and Quaternary eolian deposits in eastern Gansu province: implications for provenance and weathering intensity[J]. *Journal of Geomechanics*, 27(3): 475-490. (in Chinese with English abstract)
- SHAO S J, LONG J Y, YANG S, et al., 2006. Analysis of structural deformation properties of collapsible loess[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 27(10): 1668-1672. (in Chinese with English abstract)
- SHAO S J, LI J, LI G L, et al., 2015. Evaluation method for self-weight collapsible deformation of large thickness loess foundation[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 37(6): 965-978. (in Chinese with English abstract)
- SHI H Q, 2008. In-situ immersion test and analysis of Pleistocene Epoch Q_2 loess at Xi'an tableland[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology. (in Chinese with English abstract)
- SLOAN S W, KLEEMAN P W, 1995. Upper bound limit analysis using discontinuous velocity fields[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 127(1-4): 293-314.
- SU R, ZHANG H R, ZHANG W J, et al., 2020. Immersion tests on self-weight collapsible loess site with large depth of Lanzhou metro line[J]. *China Civil Engineering Journal*, 53(S1): 186-193. (in Chinese with English abstract)
- SUN P, LI R J, LIU J D, et al., 2016. Structural index and dynamic strength attenuation characteristics of structural loess in Pan'an[J]. *Science & Technology Review*, 34(5): 74-78. (in Chinese with English abstract)
- WANG Q M, FAN H G, LIU Y, et al., 2022. Study on field immersion test of large thickness self-weight collapsible loess sites[J]. *Geotechnical Engineering Technique*, 36(5): 409-416. (in Chinese with English abstract)
- WANG X J, MI W J, XIONG Z W, et al., 2012. Water immersion field tests of collapsibility of loess foundation of Zhengzhou-Xi'an passenger dedicated line[J]. *Journal of the China Railway Society*, 34(1): 83-90. (in Chinese with English abstract)
- WANG Y H, ZHANG X H, YUAN Q G, 2013. Analysis and study on self-weight collapsible test of big thickness loess under overburden Pressure[J]. *Site Investigation Science and Technology*(3): 5-8. (in Chinese with English abstract)
- WANG Z J, PAN J Y, MA Y, et al., 2016. Immersion test on the self-weight collapsible loess in the Dongzhiyuan area[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 43(2): 75-82. (in Chinese with English abstract)
- WANG Z Q, 2022. Experimental study on structural and engineering mechanical properties of paleosol in loess stratum[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology. (in Chinese with English abstract)
- WU X P, CHU H D, QU Y H, et al., 2011. Discussion on judging methods for the maximum depth of collapsible loess under overburden pressure[J]. *Northwestern Seismological Journal*, 33(S1): 218-222. (in Chinese with English abstract)
- XU L, DAI F C, 2009. Discussion on the further research in loess hydrocompaction[J]. *Journal of Geomechanics*, 15(1): 88-94, 104. (in Chinese with English abstract)
- XU X J, FAN J T, YUAN K J, et al., 2023. Field immersion test on large thickness of wet subsidence loess[J]. *Journal of Xi'an University of Architecture and Technology (Natural Science Edition)*, 55(06): 849-857. (in Chinese with English abstract)
- YANG Z, WANG J D, LI K C, et al., 2022. Field test pit immersion test study on loess plateau section of Xi'an North to Airport Intercity Railway[J]. *Journal of Railway*, 44(06): 107-115. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG T L, LIU D, LI Q, et al., 2023. Research on rapid evaluation method of wet subsidence of deep self-weighted loess site based on static touch test[J]. *Journal of Engineering Geology*, 31(05): 1767-1773. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO J G, LYU Y Q, CHAO J, et al., 2020. The law of soaking infiltration and collapse deformation in typical loess-paleosol series[J]. *Coal Geology & Exploration*, 48(3): 152-159, 168. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO M, TAN B R, DENG R, et al., 2022. Influence of "Agglomeration" Degree of Clay Minerals in Railway Subgrade Body on Mechanical Properties[J]. *Railway Investigation and Surveying*, 48(6): 59-65.
- ZHENG J G, DENG G H, LIU Z H, et al., 2015. Influence of discontinuous distribution of collapsible loess on its deformation[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 37(1): 165-170. (in Chinese with English abstract)
- ZHOU Y L, WU X P, FANG J H, et al., 2018. Comparative study on field and laboratory tests for collapsibility characteristics of large thickness loess[J]. *Railway Engineering*, 58(1): 114-117. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 陈家乐, 倪万魁, 王海曼, 等, 2024. 原状黄土土-水特征曲线与湿陷性的相关性[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 35(02): 107-114.
- 陈正汉, 刘祖典, 1986. 黄土的湿陷变形机理[J]. *岩土工程学报*, 8(2): 1-12.
- 范文, 魏亚妮, 于渤, 等, 2022. 黄土湿陷微观机理研究现状及发展趋势[J]. *水文地质工程地质*, 49(5): 144-156.
- 黄雪峰, 杨校辉, 2013. 湿陷性黄土现场浸水试验研究进展[J]. *岩土力学*, 34(S2): 222-228.
- 冷艳秋, 2018. 黄土水敏特性及其灾变机制研究[D]. 西安: 长安大学.
- 李滨, 2009. 多级旋转型黄土滑坡形成演化机理研究[D]. 西安: 长安大学.
- 李大展, 何颐华, 隋国秀, 1993. Q_2 黄土大面积浸水试验研究[J]. *岩土工程学报*, 15(2): 1-11.
- 李开超, 王庆满, 2017. 黄土自重湿陷量室内外试验值差异原因探讨[J]. *山西建筑*, 43(3): 47-48.
- 梁庆国, 房军, 张晋东, 等, 2018. 兰州轨道交通扰动场地黄土浸水试验研究[J]. *地质力学学报*, 24(6): 803-812.
- 鲁洁, 2020. 黄土地区古土壤工程特性研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学.

- 慕焕东, 孙萍, 李荣建, 等, 2017. 磐安结构性黄土动阻尼特征及其演化规律研究[J]. 地质力学学报, 23(6): 935-942.
- 彭建兵, 林鸿州, 王启耀, 等, 2014. 黄土地质灾害研究中的关键问题与创新思路[J]. 工程地质学报, 22(4): 684-691.
- 綦琳, 乔彦松, 刘宗秀, 等, 2021. 陇东新近纪红粘土与第四纪黄土地球化学特征及其物源和风化指示意义[J]. 地质力学学报, 27(3): 475-490.
- 邵生俊, 龙吉勇, 杨生, 等, 2006. 湿陷性黄土结构性变形特性分析[J]. 岩土力学, 27(10): 1668-1672.
- 邵生俊, 李骏, 李国良, 等, 2015. 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, 37(6): 965-978.
- 石怀清, 2008. 西安塬区中更新世 Q_2 黄土场地浸水试验与研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学.
- 苏忍, 张恒睿, 张稳军, 等, 2020. 兰州地铁大厚度湿陷性黄土场地的现场浸水试验研究[J]. 土木工程学报, 53(S1): 186-193.
- 孙萍, 李荣建, 刘军定, 等, 2016. 磐安结构性黄土的构度及动强度衰减特性[J]. 科技导报, 34(5): 74-78.
- 王庆满, 范寒光, 刘艺, 等, 2022. 大厚度自重湿陷性黄土场地现场浸水试验研究[J]. 岩土工程技术, 36(5): 409-416.
- 王小军, 米维军, 熊治文, 等, 2012. 郑西客运专线黄土地基湿陷性现场浸水试验研究[J]. 铁道学报, 34(1): 83-90.
- 王延辉, 张希宏, 袁勤刚, 2013. 大厚度黄土自重湿陷性试验分析研究[J]. 勘察科学技术(3): 5-8.
- 王治军, 潘俊义, 马闫, 等, 2016. 董志塬大厚度自重湿陷性黄土场地浸水试验研究[J]. 水文地质工程地质, 43(2): 75-82.
- 王志强, 2022. 黄土地层古土壤的结构性及工程力学特性试验研究[D]. 西安: 西安理工大学.
- 武小鹏, 楚华栋, 屈耀辉, 等, 2011. 自重湿陷性黄土下限深度判定方法探讨[J]. 西北地震学报, 33(S1): 218-222.
- 许领, 戴福初, 2009. 黄土湿陷机理研究现状及有关问题探讨[J]. 地质力学学报, 15(1): 88-94, 104.
- 徐西久, 范江涛, 袁可佳, 等, 2023. 大厚度湿陷性黄土现场浸水试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 55(06): 849-857.
- 杨喆, 王家鼎, 李开超, 等, 2022. 西安北至机场城际铁路黄土塬段现场试坑浸水试验研究[J]. 铁道学报, 44(06): 107-115.
- 张天林, 刘德仁, 李青, 等, 2023. 基于静力触探测试的深厚自重黄土场地湿陷性快速评价方法研究[J]. 工程地质学报, 31(05): 1767-1773.
- 赵金刚, 吕远强, 晁军, 等, 2020. 典型黄土-古土壤系列浸水渗透及湿陷变形规律[J]. 煤田地质与勘探, 48(3): 152-159, 168.
- 赵蒙, 谭博仁, 邓瑞, 等, 2022. 铁路路基本体中黏土矿物“团块化”程度对力学特性的影响[J]. 铁道勘察, 48(6): 59-65.
- 郑建国, 邓国华, 刘争宏, 等, 2015. 黄土湿陷性分布不连续对湿陷变形的影响研究[J]. 岩土工程学报, 37(1): 165-170.
- 中华人民共和国国家标准. 2018. 湿陷性黄土地区建筑规范(GB50025—2018)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社.
- 周有禄, 武小鹏, 房建宏, 等, 2018. 大厚度黄土湿陷特性现场及室内试验对比研究[J]. 铁道建筑, 58(1): 114-117.