



引文格式: 司俊泽, 孙某, 许健, 等. 低含水率无序黄土填方地基注水增湿试验研究[J]. 西北地质, 2025, 58(2): 136–145. DOI: 10.12401/j.nwg.2024128

Citation: SI Junze, SUN Mo, XU Jian, et al. Experimental Study on Water Injection Based Humidification of Disorderly Filled Loess Foundation with Low Water Content[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(2): 136–145. DOI: 10.12401/j.nwg.2024128

低含水率无序黄土填方地基注水增湿试验研究

司俊泽¹, 孙某², 许健^{1,*}, 张鉴³, 杨少飞⁴, 于永堂^{1,4}

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065; 3. 中建三局集团有限公司, 湖北 武汉 430075; 4. 中联西北工程设计研究院有限公司 陕西 西安 710077)

摘要: 为探究低含水率无序黄土填方地基的有效增湿方法, 在兰州新区某建设工程填方区分别开展了三种不同注水方案的现场注水增湿对比试验研究, 分析了三种不同试验方法的增湿效果。试验结果表明: 三种注水方式增湿最大影响深度均未达到拟增湿深度, 其主要原因是无序填方内部结构松散、孔隙发育, 注水后水分沿优势渗流通道迁移; 采用三种孔深条件(孔深 6 m、13 m 及 21 m)进行地基注水增湿后, 土层含水率的分布最为均匀, 增湿效果最优; 采用该方法所需的单位面积注水量最少, 仅为 $1.61 \text{ m}^3/\text{m}^2$, 较其他两种注水方式分别减少了 62% 和 34%。

关键词: 低含水率; 黄土填方地基; 注水增湿; 现场试验

中图分类号: P642; TU472

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2025)02-0136-10

Experimental Study on Water Injection Based Humidification of Disorderly Filled Loess Foundation with Low Water Content

SI Junze¹, SUN Mo², XU Jian^{1,*}, ZHANG Jian³, YANG Shaofei⁴, YU Yongtang^{1,4}

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China; 2. Power China Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, Shaanxi, China; 3. China Construction Third Engineering Group Co., Ltd., Wuhan 430075, Hubei, China; 4. China United Northwest Institute for Engineering Design & Research Co., Ltd., Xi'an 710077, Shaanxi, China)

Abstract: To explore effective humidifying methods for disorderly filled loess foundation with low water content, comparative field experiments using three different water injection schemes were conducted on water injection based humidification in the fill area of a construction project in Lanzhou New Area, and the humidification effects of the three different experimental methods were analyzed. The experimental results show that all the maximum humidification depths of the three water injection methods did not reach the designed wetting depths. This is primarily attributed to the loose internal structure and significant pore networks within the disorderly filled foundation, which caused preferential water migration along dominant seepage channels. Utilizing three

收稿日期: 2024-06-03; 修回日期: 2024-06-12; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 陕西高校青年创新团队“西北特殊土工程与防灾创新团队”(2023-2026)资助。

作者简介: 司俊泽(1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向为湿陷性黄土地基处理技术研究。E-mail: 15664620230@163.com。

* 通讯作者: 许健(1980-), 男, 博士, 教授, 主要从事特殊土力学与环境岩土工程研究。E-mail: xujian@xauat.edu.cn。

different hole depth (i.e. 6 m, 13 m, and 21 m) for water injection based humidification, water content distribution is most uniform, and thus the humidification effect is best. Moreover, the required water injection amount per unit area based on three different hole depth is least, only $1.61 \text{ m}^3/\text{m}^2$, which is 62% and 34% less compared with the other two test schemes, respectively.

Keywords: low water content; loess fill foundation; water injection based humidification; field test

近年来,中国西部城市为拓展用地空间,出现了大量在黄土回填场地上建设的工程项目。然而,许多工程建设场地属于无序回填类型,其特点表现为:未经专项勘察设计、原地形未作处理、填方施工缺乏压实措施,导致地基土处于欠固结状态,且其填土含水率较低,表现出显著的湿陷性特征(Yao et al., 2021; 孙萍萍等, 2019; 徐文涛等, 2023; Wu et al., 2024; Wang et al., 2023)。

在湿陷性黄土场地上开展工程建设,须采用合理可靠的地基处理措施(Shi et al., 2020; 郭倩怡等, 2021)。湿陷性黄土地基的处理方式主要有强夯法,挤密法及垫层法等(周仁等, 2018; Gao et al., 2020)。强夯法及垫层法的有效加固深度较浅,适用于处理层厚较浅的湿陷性黄土地基,而对于大厚度湿陷性黄土地基的处理,挤密法的应用更为广泛(王雪浪等, 2010; 郑刚等, 2012; 陈海军, 2014)。若采用上述压实方法进行地基处理,当土体含水率偏低时,压实效果达到某一限度后将无法继续有效提升土体的密实度,导致地基的压实度不足,进而影响地基处理的质量。只有在土体的含水率接近其最优含水率时,地基的加固效果才能达到最佳。因此,在开展低含水率无序黄土填方地基处理前,必须实施注水增湿预处理,以确保土体含水率达到最优压实区间。满俊英等(2012)借助兰州国家石油储备基地工程,利用砂井对地基进行预增湿,再采取高能级强夯处理,有效改善了地基土的各项物理力学指标,消除了地基土的湿陷性。闫秀维(2017)采用单一孔深的注水增湿技术对某湿陷性黄土地基进行预增湿,认为湿陷性黄土地基注水预增湿后采取高能级强夯能够有效改善地基土的各项参数,可显著消除地基土的湿陷性,提高地基承载力。刘洋等(2020)依托山西大学建设项目,采用了注水增湿与强夯法相结合的湿陷性黄土地基处理方案,改善了黄土的湿陷性,从而提高黄土地基的承载能力。包新凯(2023)结合兰州新区化工园区标准化专用厂房湿陷性黄土地基处理工程的案例,采用沉管成孔注水增湿挤密桩法有效解决了大厚度回填及填挖方区土层含水率低、湿

陷性处理深度超深等难题,使挤密桩施工效率大幅提升。李军辉等(2014)借助甘肃靖远电厂三期净化站项目,利用深浅注水孔联合增湿技术对地基土进行增湿处理,较为有效地解决了地基土深层与浅层增湿不均匀的问题。然而,对于无序填筑的低含水率回填黄土地基注水增湿的具体处理效果,目前国内鲜有相关报道。

依托兰州新区某建设工程,在填方区开展了不同布置形式的现场注水增湿对比试验。通过现场取样,获得了增湿处理前后地基土的含水率,分析了三种不同注水方案对低含水率地基土的增湿效果,相关成果可为类似场地的地基增湿工程提供借鉴。

1 工程概况

1.1 工程地质条件

试验场地位于甘肃省兰州市兰州新区,地处秦王川盆地东南边缘。原场地为剥蚀堆积丘陵地貌,分布有黄土梁峁与沟谷。2016年已对场地内存在的黄土梁峁和沟谷挖填整平,场地地势总体为东南低、西北高。整平后场地地形起伏变缓,高程为 $1\,899.07\sim 1\,924.49 \text{ m}$,高差为 25.42 m 。场地东西两侧由素土无序回填而成,填土最大厚度达到 29.8 m ,场地区位及整平前后地貌见图1。场地的地层自上而下依次为素填土层、马兰黄土层、砾砂层、离石黄土层、强风化泥岩层和中风化泥岩层。由于本工程采取简单堆填方式进行造地,导致填土密实度分布不均、土质疏松,挖方区、填方区均零星分布有落水洞、地面塌陷及冲沟(图2~图4)。

经现场勘察取样和室内试验显示,本工程场地最大湿陷量为 $4\,195 \text{ mm}$,最大湿陷深度约 49 m ,为IV级(很严重)自重湿陷性黄土地基。在地基处理深度范围内地层由新至老依次为:

(1)素填土层(Q_4^{ml}):层厚 $0.60\sim 29.80 \text{ m}$,褐黄色,以粉土为主,密实度不一,表层含植物根系及砾石颗粒,为无序填土;压缩系数 $a_{1.2}$ 介于 $0.06 \text{ MPa}^{-1}\sim 0.66$

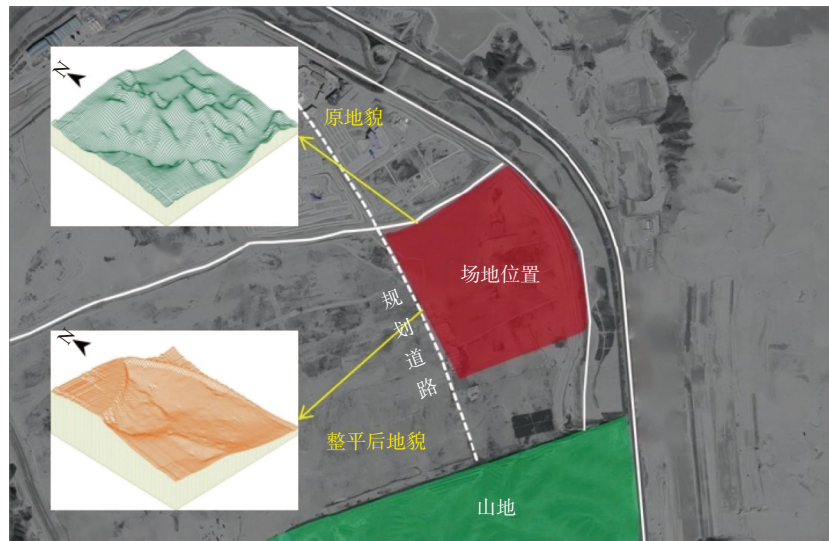


图1 场地区位及地貌图

Fig. 1 Site location and landform map



图2 地面塌陷

Fig. 2 Ground collapse



图4 冲沟

Fig. 4 Gully



图3 落水洞

Fig. 3 Sinkhole

MPa^{-1} , 平均为 0.17 MPa^{-1} , 整体呈中压缩性, 处于欠固结状态; 其湿陷系数 δ_s 介于 $0.003 \sim 0.189$, 自重湿陷性系数 δ_{zs} 介于 $0.002 \sim 0.158$ 。

(2) 马兰黄土层(Q_3^{col}): 层厚 $41.50 \sim 94.00 \text{ m}$, 褐黄色, 土质较均匀, 孔隙、虫孔较发育明显, 含白色钙质条纹, 局部含有少量粉砂, 偶有粉质粘土夹层; 其压缩

系数 $a_{1,2}$ 介于 $0.09 \sim 0.54 \text{ MPa}^{-1}$, 平均 0.16 MPa^{-1} , 整体呈中压缩性; 其湿陷系数 δ_s 介于 $0.001 \sim 0.188$, 自重湿陷性系数 δ_{zs} 介于 $0.002 \sim 0.180$ 。

2 试验概况

在工程建设场地填方区域选取三个试验区进行注水增湿试验, 试验区位于综合训练馆, 注水增湿试验区位置如图 5 所示。试验前进行了探井取样, 测定的地基土层含水率及干密度见表 1。

2.1 注水增湿参数设计

增湿试验共设置三种不同的实施方案: ①群孔内所有注水孔孔深均为 21 m ; ②群孔内注水孔孔深分为 13 m 及 21 m 两种, 梅花形交错布设; ③群孔内注水孔孔深分为 6 m 、 13 m 及 21 m 三种。注水孔平面布置见图 6, 各注水孔对应的设计有效增湿深度由小到大依次为 8 m 、 15 m 、 23 m 。其中, 同一孔深条件(孔深

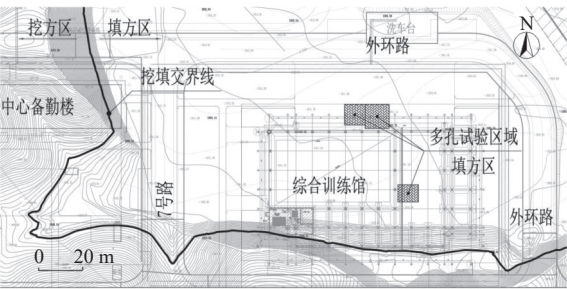


图5 试验区场地

Fig. 5 Plan location of the test site

21 m) 试验区尺寸为 $7.5\text{ m} \times 9.0\text{ m} = 67.5\text{ m}^2$, 两种孔深条件(孔深 13 m 及 21 m)试验区尺寸为 $9\text{ m} \times 9\text{ m} = 81\text{ m}^2$, 三种孔深条件(孔深 6 m、13 m 及 21 m)试验区尺寸为 $10.5\text{ m} \times 10.5\text{ m} = 110.25\text{ m}^2$ 。根据现有施工条件及当地经验, 试验场地注水孔直径为 150 mm, 孔间距为 1.5 m, 注水孔剖面示意图见图 7。注水孔成孔后立即灌入粒径为 10~30 mm 的砂石, 然后修筑注水围堰以防止水分外流, 堰体人工夯实处理, 围堰面积同各子试验区面积, 围堰高度不低于 50 cm。

表 1 增湿前地基土含水率及干密度统计表

Tab. 1 Statistical table on moisture content and dry density of foundation soil before humidification

土层	土层厚度 (m)	含水率 w (%)			干密度 ρ_d (g/cm^3)			最优含 水率 w_{op} (%)	最大干密度 ρ_{dmax} (g/cm^3)
		最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值		
素填土	4	8.55	5.03	6.66	1.27	1.21	1.23	14.7	1.78
马兰黄土	19	7.93	4.94	5.93	1.50	1.30	1.42		

注: 表中最优含水率由轻型击实试验获得。

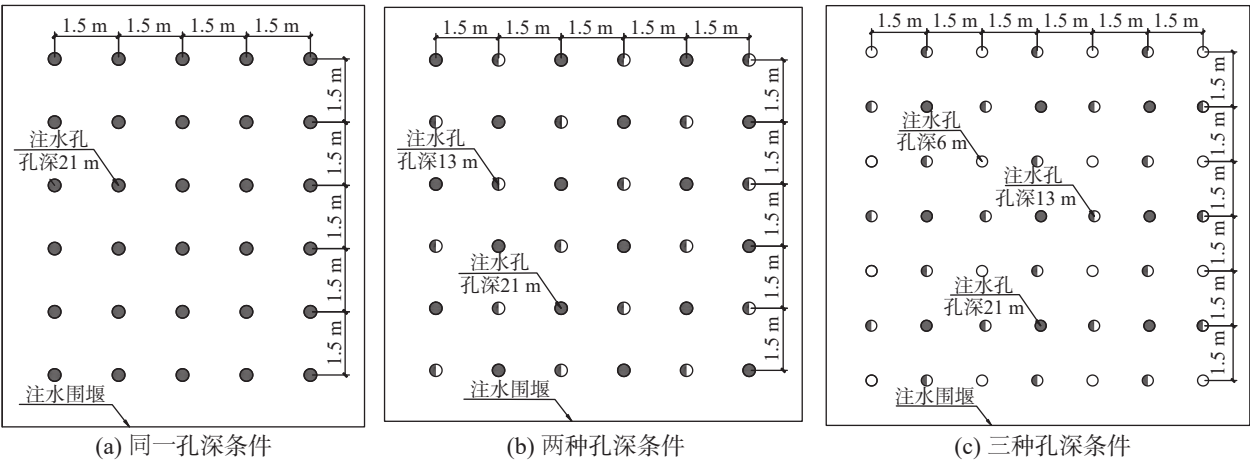


图6 注水孔平面布置示意图

Fig. 6 Schematic diagram of water injection hole layout

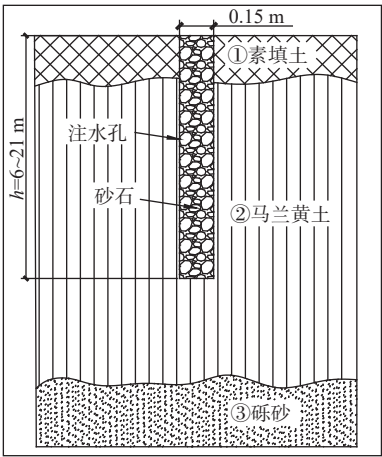


图7 注水孔剖面示意图

Fig. 7 Schematic diagram of water injection hole profile

2.2 增湿注水量计算

通过室内击实试验测定最优含水率后, 可根据式 (1) 计算试验区单孔所需注水量:

$$Q = k(w_{op} - \bar{w})\bar{\rho}_d Ah \quad (1)$$

式中: Q 为估算注水量 (m^3); k 为折减系数, 可取 0.90~1.05, 本试验取 1.00; w_{op} 为土的最优含水率 (%), 根据土工试验确定; $\bar{w}$ 为拟增湿土层的天然含水率, 采用厚度的加权平均值计算 (%); $\bar{\rho}_d$ 为拟增湿土层地基处理前土的平均干密度 (g/cm^3); A 为单个注水孔处理面积 (m^2); h 为拟增湿土层厚度 (m)。注水增湿试验设计参数见表 2。

2.3 注水孔施工工序

本试验注水施工流程如下: 场地平整→测量放

表 2 注水增湿试验设计参数
Tab. 2 Design parameters for water injection test

孔深 (m)	折减系数 k	最优含水率 $w_{op}(\%)$	天然含水率 $\bar{w}(\%)$	土层平均干重度 $\bar{\gamma}_d(t/m^3)$	围堰面积 $A(m^2)$	增湿深度加权 平均值 $h(m)$	注水量 $Q(m^3)$	备注
21	1.0	14.9	6.6	1.36	67.5	23.0	176.1	同一孔深条件
13/21	1.0	14.9	6.6	1.36	81.0	19.0	174.6	两种孔深条件
6/13/21	1.0	14.9	6.6	1.36	110.3	14.2	177.4	三种孔深条件

注：表中最优含水率由轻型击实试验获得。

线→柴油锤打桩机就位→对准桩点→沉管施工至设计深度→回填石料→围堰修筑→注水增湿。为提高

地基土增湿效果,注水分4次进行。注水孔主要施工过程见图8。



(a) 注水孔成孔施工



(b) 注水孔回填砾石

图8 注水孔主要施工过程

Fig. 8 Main construction process of water injection holes

2.4 现场试验方法

(1)注水至理论设计注水量后,待注水孔及围堰内地表无积水时,在既定时间选择特定位置对注水后试验区不同深度土层含水量进行取样测试。取样采用人工洛阳铲提取土样,含水量测试按下述原则进行:

①从注水后注水孔及围堰内地表无积水起算,取样时间间隔分别为1天、2天、3天、6天、10天、15天;②取样时,每次取样孔数量不应少于3孔,当后期取样孔可能与前期已取样孔重叠时,应确保新钻孔与已取样孔间距大于100 mm,以防新老取样孔串孔;③取样时沿取样孔深度方向每1 m取1组土样,每组2个土样,于每个取样单元的中心位置处取样,试样采用电热烘箱烘干。

(2)同一孔深条件试验区设3个含水率取样点,见图9中1~3号含水率取样点;两种孔深条件试验区设4个含水率取样点,见图9中1~3号及6号含水率取样点;三种孔深条件试验区设6个含水率取样点,见图9中1~6号含水率取样点。以图9所示浅孔、

中深孔及深孔三种孔深条件试验区注水孔布置形式为例进行说明:1号含水率取样点为浅孔与中深孔连线的中点,2号含水率取样点为最小增湿单元形心与浅孔连线的中点,3号含水率取样点为最小增湿单元

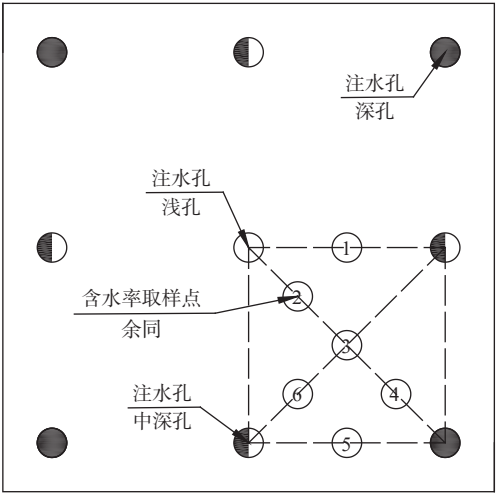


图9 含水率取样点平面布置图

Fig. 9 Sampling points layout for water content test

的形心, 4号含水率取样点为最小增湿单元形心与深孔连线的中点, 5号含水率取样点为中深孔与深孔连线的中点, 6号含水率取样点为最小增湿单元形心与中深孔连线的中点。

(3) 当取样深度超过最大有效注水增湿深度的1/2, 且连续2 m的土样均未浸水时, 即可终止取样。

3 试验结果与分析

3.1 同一孔深条件(孔深21 m)

图10为多孔注水试验同一孔深条件下不同取样点含水率随时间的变化关系曲线, 由图可知: 注水增湿最大影响深度约为18 m, 该深度值在1号取样点注水后第10天测得。在取样深度范围内, 1号取样孔各取样时间点的含水率平均值分别为5.4%、7.5%、14.3%、12.7%, 2号取样孔各取样时间点的含水率平均值分别为14.8%、7.1%、13.0%、12.7%, 3号取样孔各取样时间点的含水率平均值分别为7.0%、14.7%、11.7%、12.0%、14.9%。整个增湿单元在取样期内地基

土含水率分布不均, 沿深度方向上含水率数值跳动较大, 增湿后土体含水率普遍较低, 增湿效果差。这表明无序填方内部水分迁移的不规律性, 即注水后水分主要是沿着土体内部优势渗流通道迁移, 而非均匀渗透, 这就导致地基土注水增湿极其不均匀, 具体表现在取样时沿深度方向土体含水率时高时低, 数值上下波动大。

3.2 两种孔深条件(孔深13 m及21 m)

图11为多孔注水试验两种孔深条件下不同取样点含水率随时间的变化关系曲线, 由图可知: 注水增湿最大影响深度约为19 m, 其为3号取样点在注水后第15天的测试结果。从各取样点含水率随时间的推移沿深度方向的变化形态来看, 含水率上下波动较大, 这同样表明无序填方区内部优势渗流通道发育明显, 导致注水后水分迁移路径复杂、注水增湿效果不均匀。但与同一孔深条件相比, 中深孔(孔深13 m)显著改善了增湿效果, 体现在中深孔(孔深13 m)有效增强了4~7 m深度范围地基土的含水率, 使得深孔内的水分得以向更深处充分迁移, 从而进一步提高了15~19 m

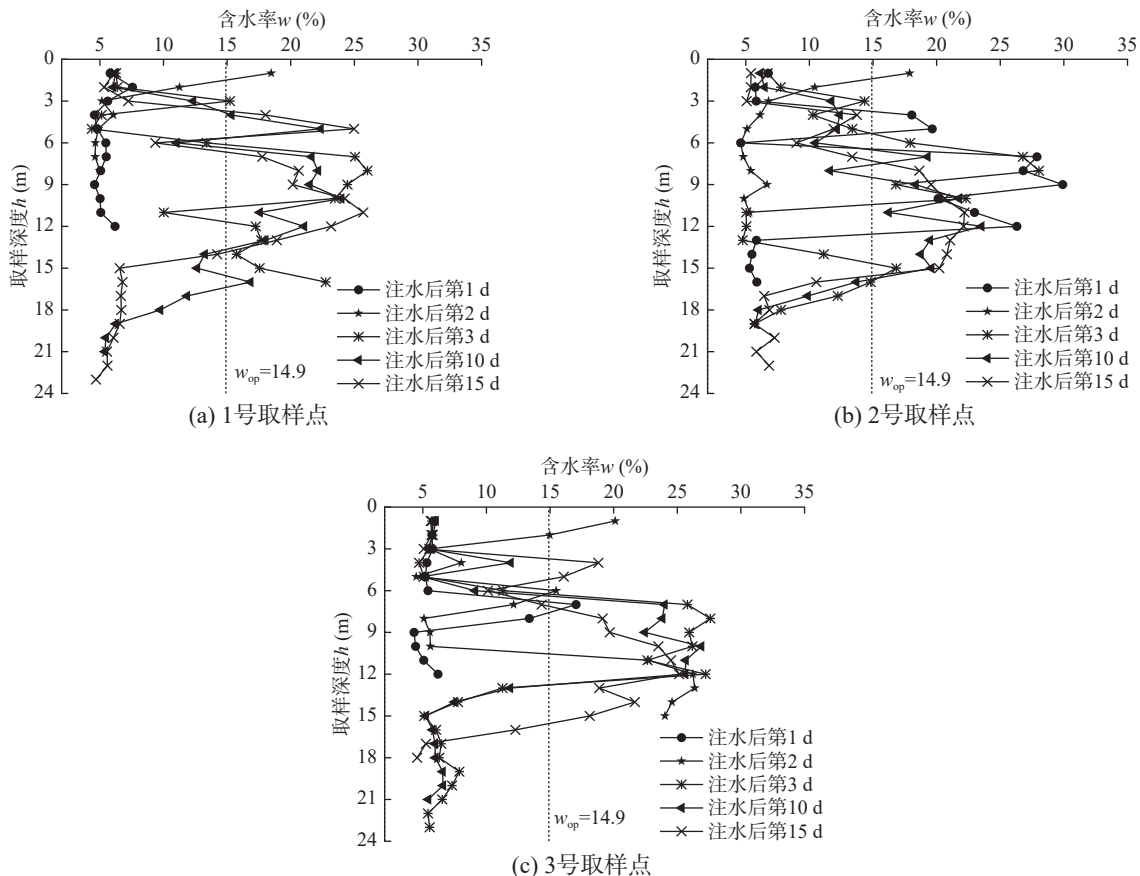


图10 同一孔深条件注水后含水率变化曲线(孔深21 m)

Fig. 10 Water content change after water injection with the same depth (i.e. 21 m)

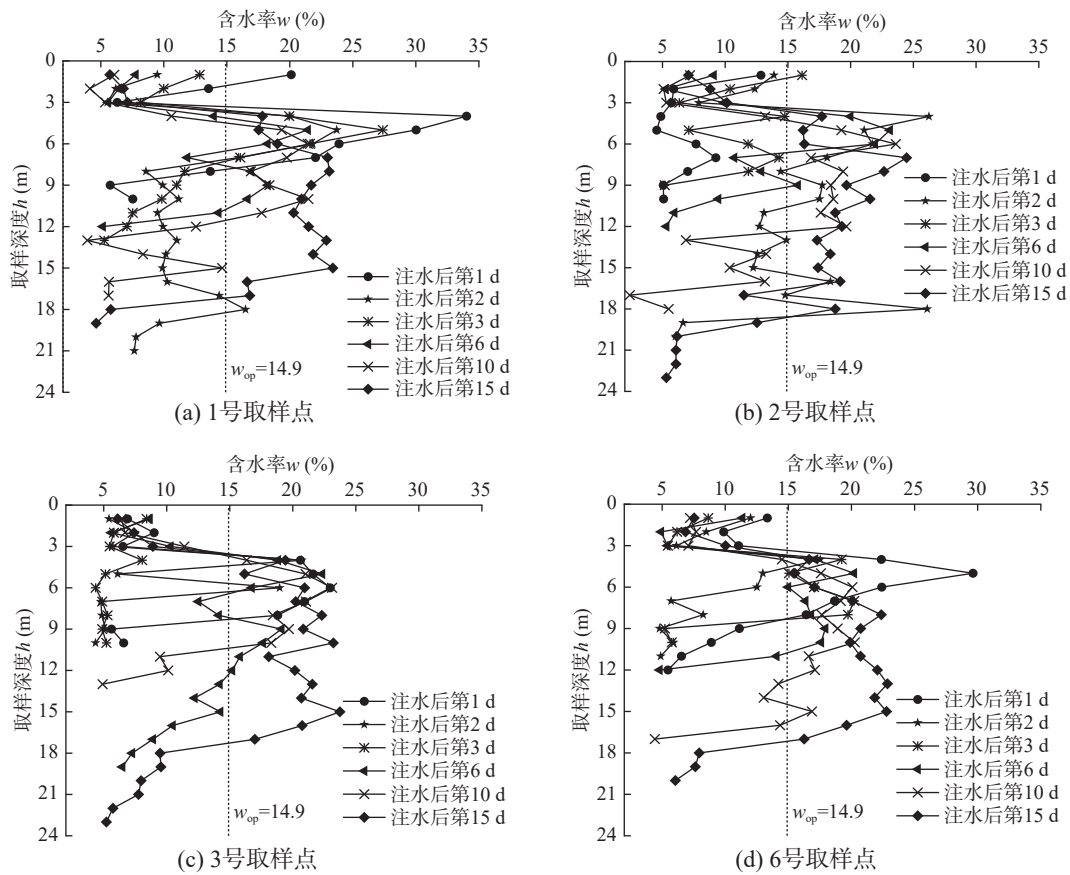


图11 两种孔深条件注水后含水率变化曲线(孔深 13 m 及 21 m)

Fig. 11 Water content change after water injection using two different hole depth (i.e. 13 m and 21 m)

深度范围土体含水率。在取样深度范围内,第1天各取样点的含水率平均值分别为 17.7%、6.8%、14.0%、14.6%,注水后第2天各取样点的含水率平均值分别为 11.9%、15.4%、8.3%、9.0%,注水后第3天各取样点的含水率平均值分别为 13.0%、10.9%、5.8%、12.3%,而注水后第15天各取样点含水率平均值分别为 16.7%、14.8%、15.4%、16.2%。显然,注水后前3天增湿单元含水率分布不均匀,2号及3号取样点土层沿深度方向基本未增湿,第15天增湿单元含水率平均值为 15.7%,接近最优含水率。

3.3 三种孔深条件(孔深 6 m、13 m 及 21 m)

图12为填方区多孔注水试验三种孔深条件下不同取样点含水率随时间的变化关系曲线。由图可知:注水增湿最大影响深度约为 18 m,该特征值于1号取样孔注水后第15天测得。其中,地面下 0~16 m 深度范围内的注水增湿效果最为显著,3号取样点为增湿单元最薄弱区域。注水后各取样时间点含水率平均值分别为 15.5%、11.4%、15.7%、15.4%、15.5%、15.2%,基本均位于最优含水率湿侧。

图13为多孔注水试验三种孔深条件下不同取样时间点含水率变化等值线图,图中 0.00 代表浅注水孔(6 m 注水孔), ± 0.53 、 ± 1.06 、 ± 1.59 分别代表 2 号、3 号及 4 号取样点。由图可知:注水后第1天,近地表 2 m 深度范围地基土基本未增湿,增湿单元形心位置 4~8 m 深度范围含水率受浅注水孔补给影响较大;注水后第2天,浅注水孔水分迅速向下部迁移,最大渗透深度达 14 m;注水后第3天开始,浅增湿孔下方有效增湿深度迅速减小,而邻近深注水孔的取样点自上而下含水率普遍较高。从整个增湿单元的角度来看,该方法注水增湿效果亦欠佳,含水率分布不均。

3.4 增湿效果对比分析

地基增湿后水分消散的设计时间为 15 天,为比较三种注水方案对地基土的增湿效果,将注水后第15天各取样点的土层含水率进行统计分析,结果见表3;注水后第15天土层含水率随深度变化规律见图14。

采用同一孔深条件注水后的第15天,0~7 m 范围内土层的平均含水率为 7.18%,与增湿前相比仅相

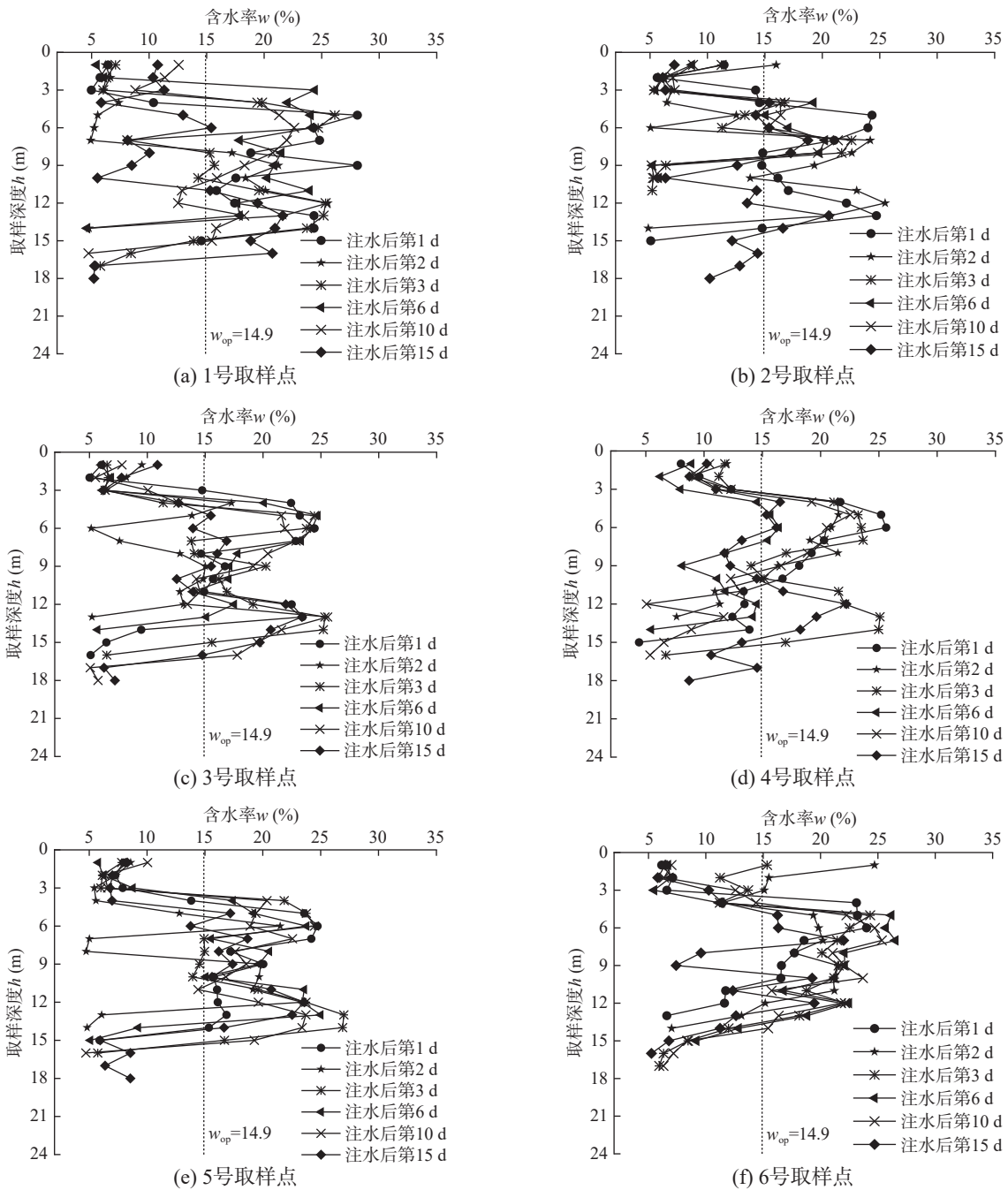


图12 三种孔深条件注水后含水率变化曲线(孔深 6 m、13 m 及 21 m)

Fig. 12 Water content variation after water injection under three different hole depth conditions (i.e. 6 m, 13 m, and 21 m)

差 0.6%; 8~15 m 范围内土层的含水率较高, 表明在注水后两周内浅层地基土未经水体充分浸湿, 水分主要聚集在中下部土层, 增湿效果较差。而采用两种孔深条件和三种孔深条件的布置方式进行增湿后, 浅层增湿效果不显著的范围仅为 4 m 和 2 m。由此可知, 采用长短孔结合的形式进行地基增湿能发挥出短孔对浅层土水分补偿的优势。

经两种孔深组合进行地基增湿后, 含水率平均值

大于三种孔深组合, 对土层含水率的提高较为显著。但在 0~18 m 深度范围内含水率大于 20% 的样本占总体的 44.4%, 土层含水率标准差较大, 接近三种孔深组合的 2 倍, 地基土增湿的均匀性较差。综上所述, 在 3 种注水增湿方案中, 采用三种孔深条件(孔深 6 m、13 m 及 21 m)进行地基注水增湿后土层含水率的分布最均匀, 增湿效果最优, 并且采用该方法所需的单位面积注水量最少, 仅为 $1.61 \text{ m}^3/\text{m}^2$, 较前两种注水方式

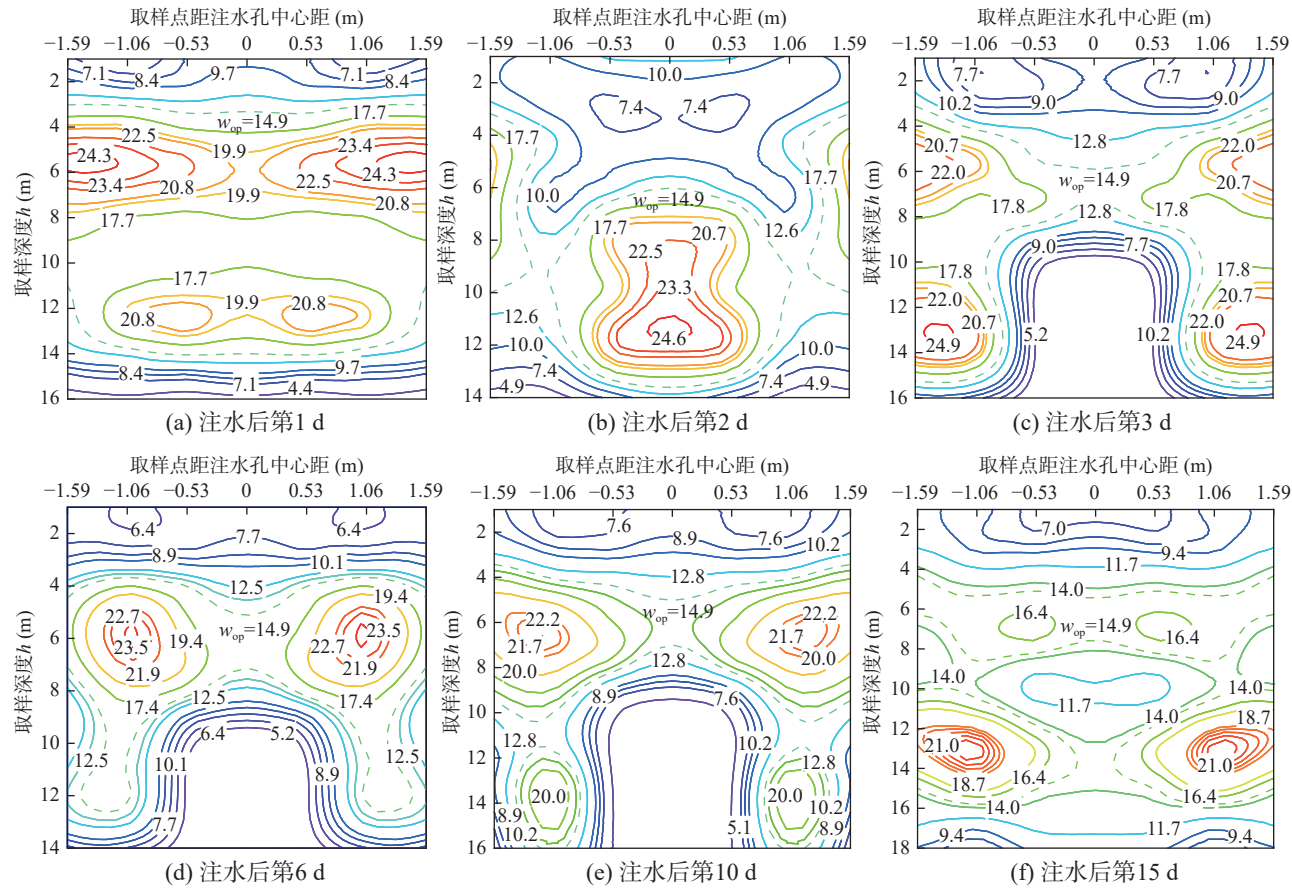


图13 三种孔深条件注水后含水率变化等值线图(孔深 6 m、13 m 及 21 m)

Fig. 13 Contour maps of water content changes after water injection under three different hole depth conditions (i.e. 6 m, 13 m, and 21 m)

表 3 注水后第 15 天地基土含水率统计表

Tab. 3 Statistical table of soil moisture content on the 15th day after water injection

注水孔布置方式	取样深度(m)	含水率范围值(%)	含水率平均值(%)	标准差
同一孔深条件	18	5.72~24.13	13.09	7.1
两种孔深条件	18	6.61~22.62	16.38	6.0
三种孔深条件	18	7.63~21.11	13.88	3.6

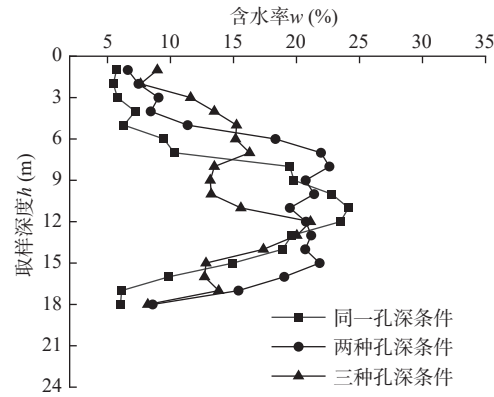


图14 注水后第 15 天土层含水率随深度变化规律曲线

Fig. 14 Soil moisture content with depth after 15 days of water injection

分别减少了 62% 和 34%。因此,在注水施工设计时应优先考虑三种孔深条件的注水方式。

4 结论

(1)采用同一孔深条件的注水方式增湿效果总体较差,注水增湿不均,土层含水率沿深度方向波动较大。

(2)采用三种孔深条件进行地基注水增湿后,土层含水率的分布最为均匀,增湿效果最优,并且采用该方法所需的单位面积注水量最少,仅为 1.61 m³/m²,较其他两种注水方式分别减少了 62% 和 34%。

(3) 无序黄土填方地基增湿处理前宜先对地基土进行针对性地预处理, 使得地表下一定范围内的松散土体得以密实, 最大限度消除填筑体内部空隙及孔洞等, 再进行地基土增湿施工, 增湿方法可采用三种孔深条件增湿法对地基土进行增湿。

参考文献(References):

- 包新凯. 沉管成孔注水增湿法处理湿陷性黄土地基的实践[J]. 山西建筑, 2023, 49(5): 129-131.
- BAO Xinkai. Practice of treating collapsible loess foundation with water injection and humidification through sinking tube drilling [J]. Shanxi Architecture, 2023, 49(5): 129-131.
- 陈海军. 兰州新区湿陷性黄土地基处理[J]. 西安科技大学学报, 2014, 34(2): 204-209.
- CHEN Haijun. Loess foundation treatment for Lanzhou new district[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2014, 34(2): 204-209.
- 郭倩怡, 王友林, 谢婉丽, 等. 黄土湿陷性与土体物性指标的相关性研究[J]. 西北地质, 2021, 54(1): 212-221.
- GUO Qianyi, WANG Youlin, XIE Wanli, et al. Study on correlation between loess collapsibility and soil physical property index[J]. Northwestern Geology, 2021, 54(1): 212-221.
- 李军辉, 祁迎喜. 湿陷性黄土地基处理中新增湿技术的应用[J]. 中国建材科技, 2014, (3): 87-90+129.
- LI Junhui, QI Yingxi. Loess foundation treatment in the application of new technologies wet[J]. China Building Materials Science & Technology, 2014, (3): 87-90+129.
- 刘洋, 秦鹏. 深厚湿陷性黄土注水增湿强夯处治技术[J]. 施工技术, 2020, 49(5): 21-23.
- LIU Yang, QIN Peng. Water Injection and Dynamic Compaction Technology for Deep Collapsible Loess[J]. Construction Technology, 2020, 49(5): 21-23.
- 满俊英, 王乐福, 袁致明, 等. 预增湿高能级强夯处理大型储罐地基试验研究[J]. 施工技术, 2012, 41(8): 77-79+83.
- MAN Junying, WANG Lefu, YUAN Zhiming, et al. Experimental research on foundation treatment by prewetting & high-energy dynamic consolidation for large storage tanks[J]. Construction Technology, 2012, 41(8): 77-79+83.
- 孙萍萍, 张茂省, 冯立, 等. 黄土水敏性及其时空分布规律[J]. 西北地质, 2019, 52(2): 117-124.
- SUN Pingping, ZHANG Maosheng, FENG Li, et al. Water sensitivity of loess and its spatial-temporal distribution on the loess plateau[J]. Northwestern Geology, 2019, 52(2): 117-124.
- 王雪浪, 朱彦鹏. 灰土挤密桩处理湿陷性黄土地基理论分析及试验[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2010, 42(2): 288-293.
- WANG Xuelang, ZHU Yanpeng. Theoretical analysis and test of the foundation of collapsible loess reinforced by lime piles[J]. Journal of Xi'an University of Architecture Technology (Natural Science Edition), 2010, 42(2): 288-293.
- 徐文涛, 张忠雄, 董宝志, 等. 大厚度湿陷性黄土填方地基增湿强夯试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2023, 21(1): 151-159.
- XU Wentao, ZHANG Zhongxiong, DONG Baozhi, et al. Experimental study on wetting and dynamic compaction of large thickness collapsible loess fill foundation[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2023, 21(1): 151-159.
- 闫秀维. 注水增湿+高能级强夯在巨厚湿陷性黄土中的应用[J]. 山西建筑, 2017, 43(36): 68-70.
- YAN Xiuwei. On application of humidification by water injection plus high dynamic compaction in hugely thick collapsible loess[J]. Shanxi Architecture, 2017, 43(36): 68-70.
- 郑刚, 龚晓南, 谢永利, 等. 地基处理技术发展综述[J]. 土木工程学报, 2012, 45(2): 127-146.
- ZHENG Gang, GONG Xiaonan, XIE Yongli, et al. State-of-the-art techniques for ground improvement in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(2): 127-146.
- 周仁, 王鸿运, 张艳军, 等. 大厚度自重湿陷性黄土处理深度研究[J]. 施工技术, 2018, 47(16): 8-11, 88.
- ZHOU Ren, WANG Hongyun, ZHANG Yanjun, et al. Research of thickness collapsible loess under overburden pressure[J]. Construction Technology, 2018, 47(16): 8-11, 88.
- Gao C H, Du G Y, Liu S Y, et al. Field study on the treatment of collapsible loess using vibratory probe compaction method[J]. Engineering Geology, 2020, 274: 105715.
- Shi B Z, Cheng X S, Gong L, et al. Selection design and parameter optimization of composite foundations in collapsible loess areas[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2020, 38(3): 3175-3201.
- Wu H, Wu M, Wu X, et al. Study on the Performance of collapsible loess subgrade improved by steel slag[J]. Journal of Building Engineering, 2024, 108642.
- Wang X W, Chen T L, Wang X, et al. Performance of screw piles in thick collapsible loess[J]. Case Studies in Construction Materials, 2023, 19: e02263.
- Yao Y G, Zhang Y C, Gao X L, et al. Study on permeability and collapsibility characteristics of sandy loess in northern Loess Plateau, China[J]. Journal of Hydrology, 2021, 603: 126883.