

黄土湿陷对预制管廊受力性能影响的试验研究

董志磊¹, 刘 辉², 李 鑫³, 邓博团²

(1. 河南省路桥建设集团有限公司, 河南 商丘 476000; 2. 西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054;

3. 中建六局第一建设有限公司, 陕西 西安 710000)

摘要: 黄土地基遇水湿陷后具有不均匀沉降特征, 对修建于其上的预制管廊结构会产生不可避免的危害。地基湿陷使得预制管廊结构可能出现开裂、错台、扭转甚至廊体坍塌, 影响预制管廊工程的安全运营。针对这一现象, 本文通过不同配比配制四种不同湿陷性的人工黄土, 经过试验后得到与原状黄土湿陷性相似的配比。并将其作为试验用土, 开展湿陷性黄土地基对预制管廊结构受力性能影响的研究工作。研究表明, 人工配制湿陷性黄土能够较好的模拟原状黄土特殊性质, 在管廊受力方面, 相较于顶底板横向应变, 基底全幅浸水对于管廊前、后侧板应变影响幅度较小; 浸水湿陷过程中会打破管廊与周围土体原有的受力平衡状态, 引起应力重分布现象, 且顶板和底板极易发生受拉破坏; 在黄土地基发生不均匀沉降后, 预制管廊结构会呈受弯、受扭状态。

关键词: 湿陷性黄土; 预制管廊; 浸水湿陷; 受力特性

中图分类号: TU990.3

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2023)05-0704-08

Experimental study on the influence of loess collapsibility on the mechanical performance of prefabricated pipe gallery

DONG Zhilei¹, LIU Hui², LI Xin³, DENG Botuan²

(1. Henan Road and Bridge Construction Group Co., Ltd, Shangqiu 476000, China;

2. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

3. The First Company of China Construction Sixth Engineering Bureau Corp., Ltd, Xi'an 710000, China)

Abstract: The loess foundation has the characteristics of uneven settlement after collapsing in water, which will inevitably cause harm to the prefabricated pipe gallery structure built on it. The foundation collapsibility may cause cracking, dislocation, torsion and even collapse of the prefabricated pipe gallery structure, which affects the safe operation of the prefabricated pipe gallery project. In view of this phenomenon, four kinds of artificial loess with different collapsibility are prepared by different proportions in this study, and the ratio similar to the collapsibility of the original loess is obtained after the test, and it is used as the test soil to carry out the research on the influence of collapsible loess foundation on the mechanical performance of prefabricated pipe gallery structure. The results shows that the artificially prepared collapsible loess can better simulate the special properties of the original loess. In terms of the stress of the pipe gallery, compared with the lateral strain of the top and bottom plates, the full-width immersion of the base has less influence on the strain of the front and rear side plates of the pipe gallery. In the process of water immersion and collapsibility, the original stress balance between the pipe gallery and the surrounding soil will be broken, causing stress redistribution, and the top and bottom plates are prone to tensile failure. After the uneven settlement of the loess foundation, the prefabricated pipe gallery structure will be bent and twisted.

Key words: collapsible loess; prefabricated pipe gallery; submerged in water; mechanical properties

目前, 我国预制管廊建设已经在各地区陆续开展, 不可避免地会穿越湿陷性黄土地区。湿陷性黄土作为一种特殊土质, 在干燥情况下土质坚硬、稳定性好, 遇水浸湿后便会发生湿陷变形,

收稿日期: 2022-07-16 修回日期: 2023-08-30

基金项目: 国家自然科学基金(42177155)

第一作者: 董志磊(1980—), 男, 学士, 高级工程师。研究方向为城市地下空间开发利用。E-mail: 1957944573@qq.com

通信作者: 刘 辉(1998—), 硕士生, 研究方向为岩土工程。E-mail: 2353375312@qq.com

产生不均匀沉降, 导致预制管廊也随之发生不均匀沉降。地基土的差异沉降作为预制管廊受力性能的重要影响因素之一, 会对湿陷性黄土地区的预制管廊建设工程造成严重影响。

在关于湿陷性黄土对地下工程的影响研究中, 翁效林、王利明、张玉伟等^[1-3]均通过模型试验研究了周边及基底全幅均匀浸水、半幅不均匀浸水工况对地铁隧道的影响; 房茂立等^[4]基于应变的设计方法对黄土地区某地下管道工程进行分析; 刘德仁等^[5]在黄土自重湿陷场地进行了现场浸水试验。

在预制管廊力学特性研究中, Pitilakis K 等^[6]研究了地表建筑对管廊结构抗震性能的影响, 得到了地表建筑对不同埋深条件下管廊变形影响程度; 邓博团等^[7-10]研究了地裂缝及地震环境下综合管廊在静、动力作用下变形规律及破坏模式; 胡翔等^[11]对预制预应力管廊接头及管廊整体结构开展了足尺模型的单调静力试验; Tsiniadis 等、冯立等^[12-13]研究了地震波激励下的综合管廊地震响应特征。

在地基不均匀沉降对预制管廊受力性能影响研究中, 赵文昊等^[14]采用数值模拟对预制拼装综合管廊进行容许差异沉降分析; Karinski 等^[15]分析了地下结构在发生变形或与周围土体发生相对滑动时结构自身的受力性能; 穆晓虎^[16]研究了黄土地层不同浸水范围对预制管廊结构受力变形的影响, 并对湿陷性黄土地基处理桩间距、处置范围及深度进行分析及对比优化; 崔允亮^[17]等采用分布式光纤监测和数值模拟分析不同预保护方案下盾构施工对管廊竖向位移的影响。

在进行湿陷性黄土模型试验时, 由于现场取土会对原状土产生扰动, 难以符合模型试验的要求, 所以需要人工配制湿陷性黄土。已有学者对此展开了研究, 如胡再强等^[18]在风干黄土颗粒中掺入 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 制样完成后向其中通入 CO_2 气体, 得到与原状黄土定向相似人工结构性黄土试样。蒋明镜等^[19]为模拟天然状态下黏土的结构性, 加入冰粒和少量水泥于原料软土之中。Basma 等^[20]以石英粉、砂作为无黏性材料, 在膨润土中掺入石膏、工业盐、石英粉、砂以及高岭土制备出具有不同湿陷性的人工黄土, 且制备过程中控制试样含水率与原状土相似。

综上所述, 学者们在不均匀沉降对于预制管

廊的影响研究方面主要集中在管廊接头受力、地基处理、节间张拉力以及不均匀沉降后的治理措施等方面。由于湿陷性黄土遇水浸湿后产生不均匀沉降的特质, 不同浸湿深度均使得预制管廊结构受力更加复杂, 仍需进一步展开研究。因此, 本文提出四组人工配制湿陷性黄土方案, 通过湿陷试验、固结试验、直剪试验结果分析优化不同成分配比, 与原状黄土各项物理力学参数进行对比, 确定与原状黄土湿陷性基本相似的配比, 将其作为试型土验模, 然后采用自行设计的模型试验装置, 开展基底全幅均匀浸水模型试验, 以期得出不同浸水深度对预制管廊结构受力变形的影响规律。

1 湿陷性黄土的人工配制

由于现场取土会对原状土产生扰动, 难以符合模型试验的要求, 所以需要人工配制湿陷性黄土。试验的主要目的是研究黄土地基浸水湿陷对管廊结构的影响, 故主要关注配制模型土在浸水湿陷后, 湿陷量与原状土相似即可。

1.1 人工配制湿陷性黄土相似材料的选择

借鉴现有研究关于湿陷性黄土相似材料的制备方法和张玉伟^[21]对于人工配制湿陷性黄土方法的研究。在重塑黄土中加入 CaO 颗粒、石膏粉以及工业盐, 制备四组不同配比的人工湿陷性黄土试样, 制备过程中控制其含水率与原状土保持一致, 相似材料配合比见表 1。

表 1 相似材料配合比
Tab. 1 Mixing ratio of similar materials

试样 编号	质量含量/%			
	重塑土	工业盐	石膏粉	CaO 粉
1 #	91	3	5	1
2 #	89	5	5	1
3 #	85	6	8	1
4 #	82	9	8	1

1.2 物理力学参数测定

在保证原状土与人工配制湿陷性黄土含水率一致的前提下, 开展人工制备湿陷性黄土试样与原状土试样的固结试验、直剪试验及湿陷试验。

(1) 固结试验结果

分别以 50、100、200 kPa 作为固结荷载, 对四组试样分别开展标准固结试验, 所得 $e-p$ 关系如图 1 所示, 由 $e-p$ 曲线图可求得各组的压缩系

数与压缩模量,见表 2。经过对比发现,试样 2 与原状黄土的压缩系数和压缩模量更加接近。

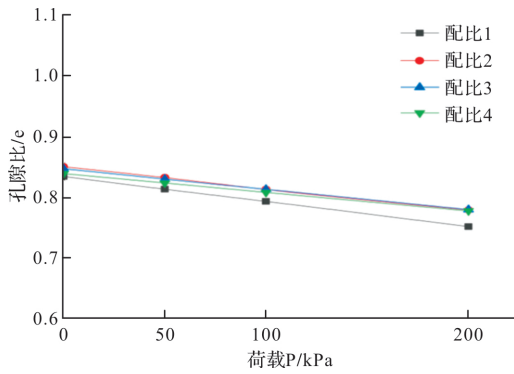


图 1 e-p 曲线图

Fig. 1 e-p curve

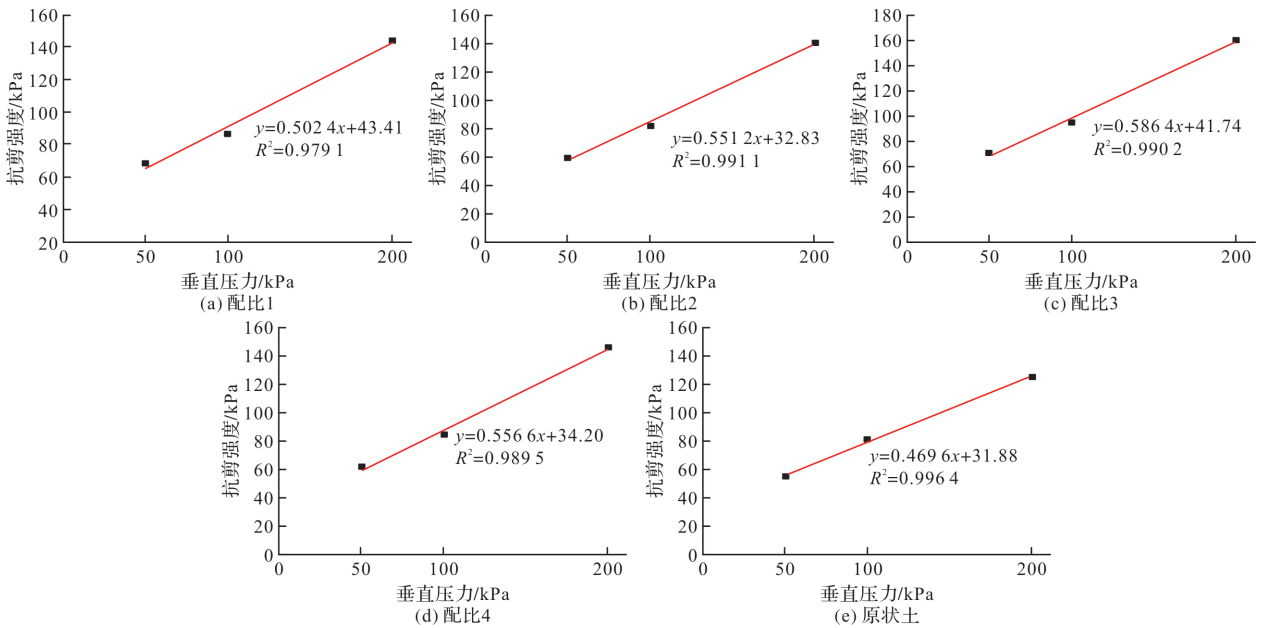


图 2 剪切试验结果

Fig. 2 Shear test results

表 3 抗剪强度参数

Tab. 3 Shear strength parameters

试样编号	1#	2#	3#	4#	原状黄土
黏聚力 c/kPa	43.41	32.83	41.74	34.20	31.88
内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	26.67	28.54	30.39	29.1	25.15

(3)湿陷试验结果

湿陷试验以单线法开展,荷载分别取 50、100、200 kPa,得到对应荷载下试样的湿陷系数见表 4,湿陷系数与压力的关系如图 3 所示。经对比,试样 2 在不同荷载等级下与原状土的湿陷系数更加接近。

经过对各试样开展的固结、直剪、湿陷试验结果可以发现,随着工业盐的增加,试样的压缩模量增加,压缩系数减小,人工制备试样的结构

表 2 固结试验参数

Tab. 2 Consolidation test parameters

试样编号	1#	2#	3#	4#	原状黄土
压缩系数/ MPa^{-1}	0.42	0.36	0.34	0.31	0.37
压缩模量/ MPa	4.37	5.14	5.43	5.85	5.1

(2)剪切试验结果

对原状黄土及四组试样开展剪切试验,试验中分别取 50 kPa、100 kPa、200 kPa 为垂直压力,剪切速率取 0.08 mm/min,根据试验结果可得试样的抗剪强度与垂直压力之间的关系,如图 2 所示。由图中垂直压力与抗剪强度的变化曲线可求得各组的黏聚力 c 与内摩擦角 φ 值,如表 3 所示。对比后发现,试样 2 与原状土的 c 、 φ 值较为接近。

强度增大;而随着荷载强度的增加,试样湿陷系数呈先增大后减小的趋势。

表 4 湿陷试验结果

Tab. 4 Collapse test results

试样编号	50 kPa	100 kPa	200 kPa
1#	0.021	0.028	0.025
2#	0.032	0.039	0.035
3#	0.035	0.048	0.043
4#	0.038	0.057	0.052
原状黄土	0.030	0.041	0.037

1.3 人工配制湿陷性黄土材料配比的选择

在人工配制湿陷性黄土试样中,分别采用了重塑黄土、CaO 颗粒、工业盐和石膏粉为基本材料,其中 CaO 颗粒由于自身具有的特性,即遇水

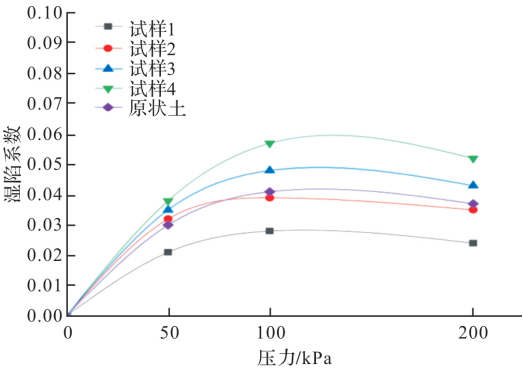


图 3 不同荷载等级下的湿陷系数

Fig. 3 Collapsibility coefficients under different load classes
后产生 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 。因此原状黄土在遇水湿陷后其结构性破坏过程及湿陷性可通过 CaO 颗粒的特性来近似模拟; 而工业盐溶于水, 能够达到加强人工制备试样湿陷性的目的, 两者含量可以调节人工制备试样的结构性和湿陷性; 石膏粉可近似模拟原状黄土的胶结质。

综合对比后发现, 试样 2 配比与原状黄土的湿陷系数及其余物理力学参数更加接近, 故选取试样 2 的配比进行人工湿陷性黄土的配制, 开展本文的模型试验。

2 黄土地基浸水湿陷模型试验研究

2.1 模型材料

本次模型试验所模拟原型预制管廊结构相关参数如表 5 所示, 地层模拟范围一般要达到地下结构半径的 3~5 倍, 综合考虑本模型试验模拟土体范围: $35\text{ m}\times 21\text{ m}\times 35\text{ m}$ (长 \times 宽 \times 高)。现有模型箱尺寸为 $1.0\text{ m}\times 0.6\text{ m}\times 1.0\text{ m}$, 故结合考虑模拟范围和模型箱尺寸等试验条件, 取几何相似比 $C_l=35$ 。为模拟实际情况, 取容重相似比 $C_\gamma=1$ 。根据相似关系得到各物理参数的相似比如下。

$C_{ES}=35, C_C=C_{ES}=1, C_\varphi=C_E=1, C_{\sigma_0}=35,$

$C_C=C_{ES}=1, C_{\sigma_s}=C_\epsilon C_E, C_H=C_l=35$

其中 E_s 、 μ 、 c 、 φ 、 σ_s 、 ϵ 分别为土体压缩模量、泊松比、黏聚力、内摩擦角、土中应力、应变; h 、 E 、 σ 分别为管廊埋深、弹性模量、应力。

表 5 原型管廊相关参数

Tab. 6 Relevant parameters of prototype pipe gallery					
原型管廊	混凝土等级	弹性模量 /MPa	单仓尺寸/m	壁厚 /m	上覆土 /m
预制拼装	C40	32.5×10^3	4×4	0.55	3

单节模型管廊采用亚克力材料制成, 在相邻

管廊内部粘贴 0.02 m 厚亚克力板通过承插方式连接, 连接处选用丁青橡胶圈模拟防水及传递内力作用, 其示意图如图 4 所示。模型管廊弹性模量为 $2.7\times 10^3\text{ MPa}$, 泊松比为 0.372, 原型管廊截面尺寸为 $4\text{ m}\times 4\text{ m}$, 壁厚为 0.55 m, 根据本次试验采用的几何相似比为 35, 确定模型预制管廊单节尺寸为 $0.10\text{ m}\times 0.10\text{ m}\times 0.10\text{ m}$, 壁厚为 0.04 m, 单节预制管廊模型如图 5 所示。

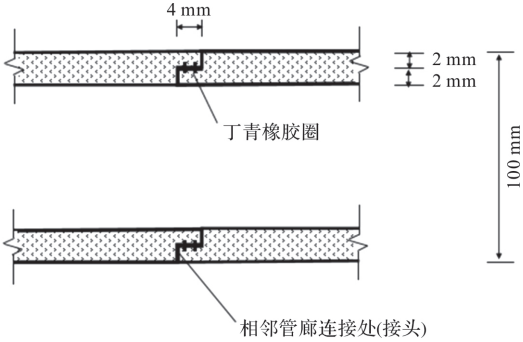


图 4 相邻管廊承插式连接示意图

Fig. 4 Schematic diagram of socket connection of adjacent pipe gallery

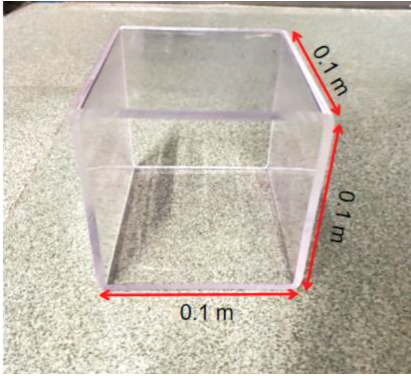


图 5 单节预制管廊模型

Fig. 5 Single-section prefabricated pipe gallery model

2.2 试验工况设计

本次模型试验主要是从宏观角度研究湿陷性黄土地基含水率改变后对预制管廊结构受力及变形的影响规律。借助自行设计模型试验箱及浸水装置开展模型试验, 主要试验内容如表 6 所示, 不同浸水工况示意图如图 6。

表 6 模拟工况试验设计

Tab. 6 Simulation test design

浸水条件	浸水深度	测试项目
基底全幅浸水	第一次浸水(20 cm)	土压力
		应变
	第二次浸水(30 cm)	地表沉降
		底部位移

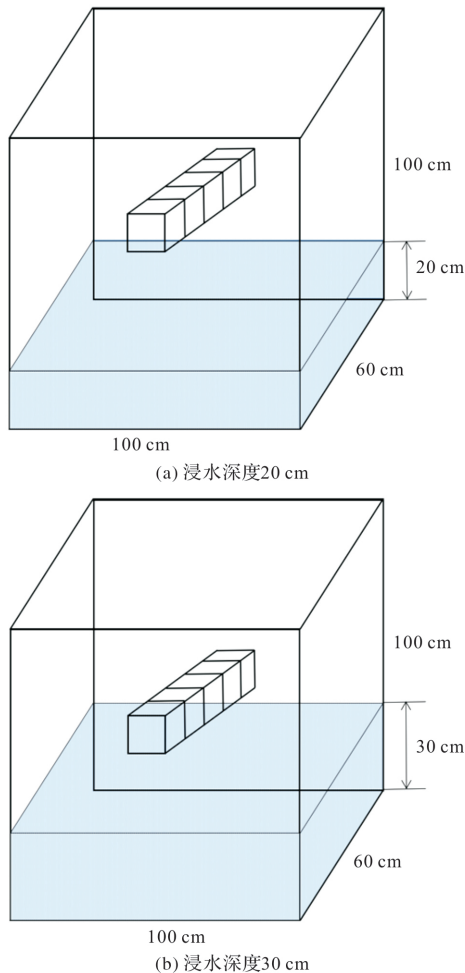


图6 基底全幅浸水工况示意图

Fig. 6 Schematic diagram of full width immersion working condition of the base

2.3 基底浸水试验结果分析

2.3.1 应变分析

沿预制管廊顶板、底板、前侧板及后侧板中轴线各设置8个BMB120-3BA双向应变花,且布设位置均相同,共计32个应变花,如图7所示。

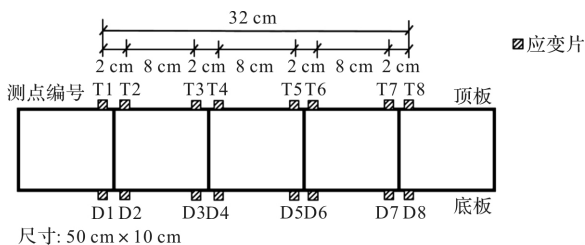


图7 应变花测点布设图

Fig. 7 Layout of strain rosette measuring point

基底全幅浸水工况下,管廊顶、底板应变变化曲线如图8、9所示,管廊前、后侧板横向应变变化曲线如图10、11所示。图中横坐标为各测点编号,纵坐标为各测点的应变测量值($\times 10^{-6}$),“+”为受拉,“-”为受压。

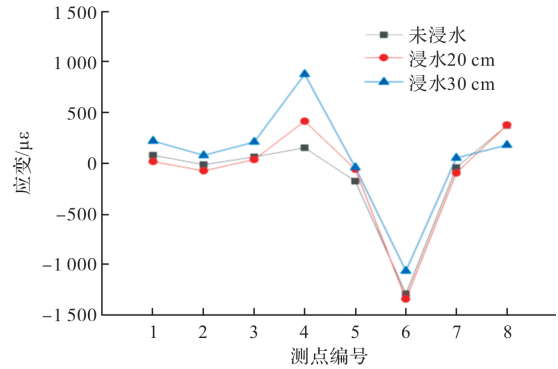


图8 全幅顶板应变

Fig. 8 Full-width roof strain

由图8可知,随着浸水深度的增加,管廊不同测点的应变呈增大趋势,其中测点4达到受拉峰值,测点6达到受压峰值。在浸水20~30 cm阶段,大部分测点应变变化幅度稍有增加。测点5、7从未浸水到浸水结束后应变基本未发生变化,表明少部分测点应变受浸水影响不大。在浸水结束后,仅有测点5和测点6呈受压状态,其余测点均承受拉状态。分析整个浸水过程,随着浸水深度的变化,管廊顶板应变测量值会有所增大。但各测点应变变化幅度较小,即说明基底全幅浸水对管廊顶板向应变影响相对较小。

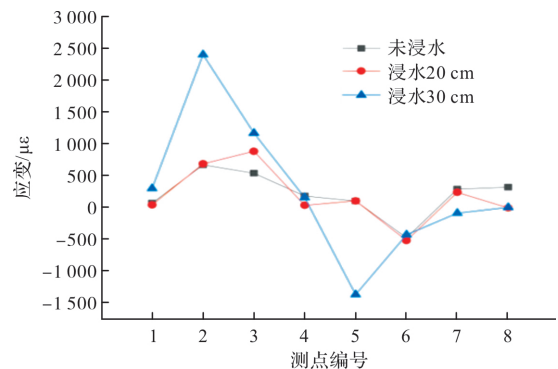


图9 全幅底板应变

Fig. 9 Full-scale bottom plate strain

由图9可知,未浸水时,仅有测点6呈受压状态,其余测点均呈受拉状态。随着浸水深度的增加,在测点2达到受拉峰值,可能会发生受拉破坏,测点5达到受压状态峰值。在浸水20~30 cm阶段,各测点应变变化幅度较为明显,其中测点2应变变化幅度最大,测点5由受拉转变为受压。说明基底全幅浸水较深时,管廊底板受力影响显著,极易发生受拉破坏,应在实际工程中对管廊底板加强防护。

由图10可知,在未浸水湿陷时各测点均呈受拉状态,受拉峰值位于测点2位置。随着浸水深度

的增加,各测点均呈应力增大趋势,其中测点6从未浸水到浸水结束后应变测量值变化最为明显,但在浸水20~30 cm阶段应变变化较小。其余测点无论是在未浸水或是浸水某个阶段,应变测量值变化幅度均较小。即说明基底全幅浸水对管廊前侧板个别处影响稍有明显,主要表现在未浸水至浸水阶段,其余位置影响均较小,且基本都呈受拉状态。

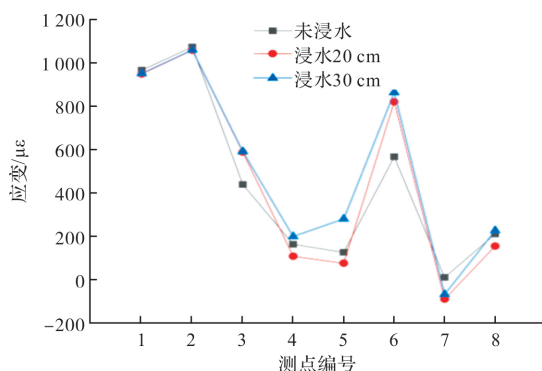


图10 全幅前侧板应变

Fig. 10 Full-width front side plate strain

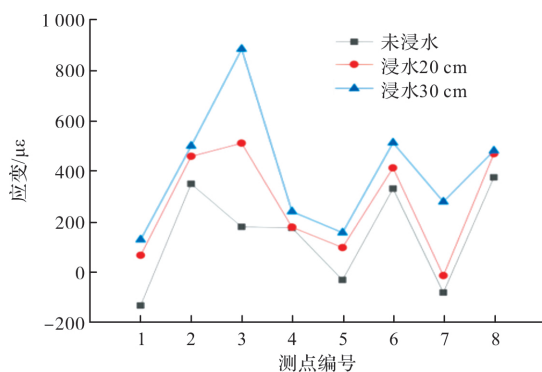


图11 全幅后侧板应变

Fig. 11 Full-width rear side panel strain

由图11可知,未浸水状态下,测点1、5、7均呈受压状态,其余测点均呈受拉状态。随着浸水深度的增加,各测点的应变测量值均呈增大趋势,个别测点变化较为明显:测点3从未浸水到浸水20 cm再到浸水30 cm两个阶段应变测量值变化幅度都较大,并在浸水结束后达到受拉峰值;测点7应变测量值受浸水深度变化较大,主要体现在浸水20~30 cm阶段。其余测点应变测量值变化较小。即表明基底全幅浸水对于管廊后侧板极个别处应变影响幅度较为明显,但总体来说管廊后侧板受到的应变影响幅度较小,且基本都呈受拉状态。

2.3.2 管廊底部位移分析

沿管廊底板中轴线位置布设5个YWC型应变

式位移传感器,如图12所示。

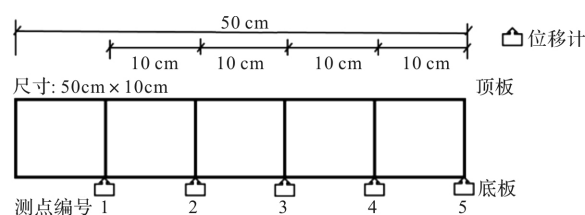


图12 位移计测点布设图

Fig. 12 Layout of displacement measuring point

图13给出了管廊结构底部相对位移变化曲线,横坐标为各测点编号,纵坐标为管廊位移测量值,“+”表示位移计缩短,“-”表示位移计伸长。

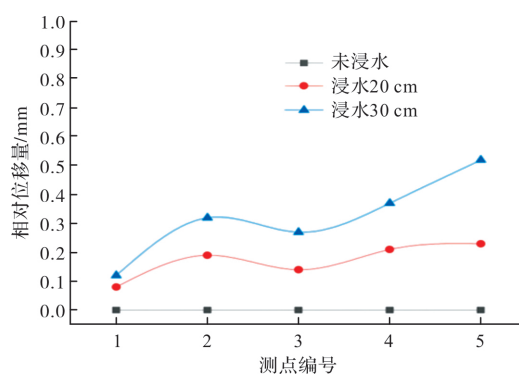


图13 全幅管廊底部位移

Fig. 13 Bottom displacement of full-width pipe gallery

由图13可知,随着浸水深度的增加,各测点位移呈增大趋势,其中测点5处相对位移值最大,大小为0.52 mm。在未浸水至浸水20 cm阶段,管廊底部均呈均匀的下沉趋势;在浸水20 cm至30 cm阶段,测点1沉降变化值最小,大小为0.12 mm。整体来看,管廊右侧沉降明显大于左侧,即说明随着浸水深度的增加,管廊基底产生不均匀沉降幅度随之增大,可能导致预制管廊结构左侧出现隆起现象。这是由于黄土浸水湿陷后会产生不均匀沉降,同时浸水深度的增加会改变土壤的水分分布和饱和度,水分进入土壤后,部分土壤颗粒可能会膨胀或流动,从而引起沉降。

2.3.3 黄土湿陷对预制管廊结构受力的影响

预制管廊埋设于地层中,管廊底部土体在上覆荷载及管廊自重作用下产生了一定的压缩量,此时管廊基础及其内部管线随地基压缩产生一定的沉降。而预制管廊是由若干节刚性管廊以承插方式连接,由于管廊结构本身刚度较大,不易发生变形,因此管廊竖向变形是通过相邻管节连接处的相对转动来实现。

管廊周围黄土层浸水湿陷后,土体强度等各项参数降低,土体含水率增大,使其自重增大。在基底全幅浸水过程中,会打破管廊与周围土体原有的受力平衡状态,引起应力重分布现象,且主要集中在管廊顶板和底板:相较于顶底板横向应变,基底全幅浸水对于管廊前、后侧板应变影响幅度较小,即受力影响较小,且基本都呈受拉状态;但是基底全幅浸水对管廊底板受力影响显著,具体体现在应变测量值变化幅度较为明显,极易发生受拉破坏,应在实际工程中对管廊底板加强防护。基于预制管廊的受力变形机理,分析得出预制管廊在黄土地基浸水湿陷时,可能使得预制管廊结构呈受弯、受剪状态,如图14所示。

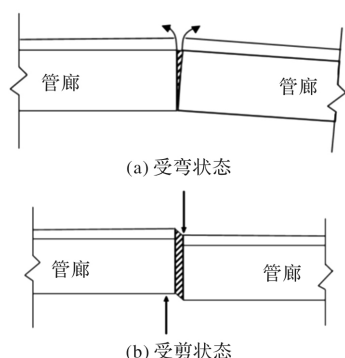


图14 不均匀沉降时预制管廊受力状态

Fig. 14 Stress state of prefabricated pipe gallery under uneven settlement

3 结论

开展了预制管廊基底全幅浸水湿陷模型试验,分析了全幅浸水工况下预制管廊结构表面应变及管底位移的变化规律。主要研究成果如下:

(1)通过对比试验得到与原状黄土湿陷性基本相似的配比,为重塑土:工业盐:石膏粉:CaO粉=89:5:5:1,并将其作为试验模型土;

(2)在湿陷性黄土地基中,预制管廊在地基未浸水时,预制管廊结构整体表现为受拉状态,随着浸水深度的增加,各测点均呈应变增大趋势。相较于管廊顶板,底板应变变化较为明显,底板可能会发生受拉破坏;

(3)在湿陷性黄土地基中,预制管廊在地基浸水过程中,管廊位移呈下沉的趋势,且随着浸水深度的增加,管廊底部产生不均匀沉降幅度随之增大,管廊右端下沉幅度明显大于左端,可能导致管廊结构左端出现隆起现象,从而打破管廊与周围土体原有的受力平衡状态,引起应力重分布

现象。随着应力重分布现象的出现,会使得预制管廊结构呈受弯和受剪的受力状态。

参考文献 References

- [1] 翁效林,王俊,王立新,等. 黄土地层浸水湿陷对地铁隧道影响试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(8): 1374-1380.
WENG Xiaolin, WANG Jun, WANG Lixin, et al. Experimental research on influence of loess collapsibility on subway tunnels [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(8): 1374-1380.
- [2] 王利明. 黄土湿陷对地铁结构稳定性影响机制及剩余湿陷量控制标准研究[D]. 长安大学, 2020.
WANG Liming. Study on the influence mechanism of loess collapsing on metro structure stability and the control standard of remaining collapsing amount [D]. Chang'an University, 2020.
- [3] 张玉伟,宋战平,翁效林,等. 大厚度黄土地层浸水湿陷对地铁隧道影响的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(5): 1030-1040.
ZHANG Yuwei, SONG Zhanping, WENG Xiaolin, et al. Model test study on influence of the collapsibility of Large Thickness loess Stratum on subway tunnels [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(5): 1030-1040.
- [4] 房茂立,刘建武,郑伟. 湿陷性黄土地区管道基于应变的设计方法[J]. 油气储运, 2016, 35(8): 888-892.
FANG Maoli, LIU Jianwu, ZHENG Wei. The strain-based design method for buried pipelines in the collapsible loess areas [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2016, 35(8): 888-892.
- [5] 刘德仁,安政山,徐硕昌等. 靖远地区大厚度黄土地基浸水湿陷过程及土中竖向应力特征试验研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(1): 268-278.
LIU Deren, AN Zhengshan, XU Shuochang, et al. Experimental study on immersion collapsibility process and vertical stress characteristics of large thickness loess foundation in Jingyuan area [J]. Geotechnical Mechanics, 2023, 44(1): 268-278.
- [6] PITILAKIS K, TSINIDIS G, LEANZA A, et al. Seismic behaviour of circular tunnels accounting for above ground structures interaction effects [J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 2014, 67: 1-15.
- [7] DENG Botuan, LI Xin, LI Pan, et al. Rationality determination method and mechanical behavior of underground utility tunnels in a ground fissure environment [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environ-

- ment, 2022, 81(1):50.1-50.23.
- [8] DENG Botuan, LI Pan, LI Xin, et al. Mechanical behavior of underground pipe gallery structure considering ground fissure[J]. Journal of Mountain Science, 2022, 19(2):547-562.
- [9] 邓博团,田江涛,苏三庆,等.地裂缝作用下管廊结构底部脱空范围计算方法[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2021,53(2):173-177,185.
- DENG Botuan, TIAN Jiangtao, SU Sanqing, et al. Calculation method of void area at the bottom of utility tunnel structure crossing ground fissures[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2021, 53(2):173-177,185.
- [10] 邓博团,田江涛,苏三庆,等.西安地区不同线型预制式管廊地震稳定性数值分析[J].隧道建设(中英文),2021,41(5):772-780.
- DENG Botuan, TIAN Jiangtao, SU Sanqing, et al. Numerical Analysis of Seismic Response of Prefabricated Utility Tunnel with Different Lines in Xi'an, China[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(5):772-780.
- [11] 胡翔,薛伟辰.预制预应力综合管廊受力性能试验研究[J].土木工程学报,2010,43(5):29-37.
- HU Xiang, XUE Weichen. Experimental study of mechanical properties of PPMT[J]. Journal of Composites for Construction, 2010, 43(5): 29-37.
- [12] GRIGORIOS T. Response characteristics of rectangular tunnels in soft soil subjected to trans-versal ground shaking [J]. Tunnelling and Undergr-ound Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2017, 62:1-22.
- [13] 冯立,丁选明,王成龙等.考虑接缝影响的地下综合管廊振动台模型试验[J].岩土力学,2020,41(4):1295-1304.
- FENG Li, DING Xuanming, WANG Chenglong, et al. Shaking table model test on seismic responses of utility tunnel with joint [J]. Geotechnical Mechanics, 2020, 41 (4): 1295-1304.
- [14] 赵文昊,彭斌,王恒栋,等.预制拼装综合管廊接头的容许差异沉降分析[J].建筑结构学报,2020,41(S1):434-442.
- ZHAO Wenhao, PENG Bin, WANG Hengdong, et al. Analysis of permissible differential settlement for assembled precast utility tunnel with different joint types [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41 (S1): 434.
- [15] KARINSKI Y S, DANCY GIER A N, LEVIATHAN I. An analytical model to evaluate the static soil pressure on a buried structure [J]. Engineering Structures, 2003, 25(1): p. 91-101.
- [16] 穆晓虎.黄土地层浸水湿陷对综合管廊结构受力变形的影响研究[D].西安:长安大学,2018.
- MU Xiaohu. Study on the Influence of Loess Flooding on the Mechanical and Deformation Characteristics of the Utility Tunnel Structure [D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [17] 崔允亮,李志远,魏纲,等.上跨拟建隧道的地下综合管廊预保护效果[J].浙江大学学报(工学版),2021,55(2):330-337.
- CUI Yunliang, LI Zhiyuan, WEI Gang, et al. Preprotection effect of underground comprehensive pipe gallery over proposed tunnel [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Edition), 2021, 55 (2): 330-337.
- [18] 胡再强,沈珠江,谢定义.结构性黄土的变形特性[J].岩石力学与工程学报,2004,23(24):4142-4146.
- HU Zaiqiang, SHEN Zhujiang, XIE Dingyi. Deformation properties of structural loess [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23 (24): 4142-4146.
- [19] 蒋明镜,沈珠江.结构性黏土试样人工制备方法研究[J].水利学报,1997(1):57-62.
- JIANG Mingjing, SHEN Zhujiang. A method of artificial preparation of structured clay samples [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997(1):57-62.
- [20] BASMA A A, TUNCER E R. Evaluation and control of collapsible soils [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 118(10):1491-1504.
- [21] 张玉伟.黄土地层浸水对地铁隧道结构受力性状的影响研究[D].西安:长安大学,2017.
- ZHANG Yuwei. Study on mechanical characteristics of Metro Tunnel based on soaking of loess layer [D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.

(编辑 桂智刚)