

黄土地基不均匀沉降对现浇管廊影响的试验研究

邓博团, 申超凡, 郑谢缙, 付一帆

(西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 湿陷性黄土地基浸水后的不均匀沉降会使现浇管廊结构产生附加内力, 造成管廊结构开裂甚至破坏, 严重威胁其运营安全。为深入研究黄土地层湿陷变形对现浇管廊的影响, 开展了黄土地层局部浸水湿陷的模型试验。在试验中, 设定局部浸水范围, 以地基浸水深度为变量, 对管廊结构底部位移、土体接触压力、表面应变和地表沉降进行了监测, 并分析了其发展趋势。试验结果表明: 当局部基底浸水深度达到 20 cm, 管廊结构在浸水区出现明显的弯曲变形, 结构在湿陷区内的最大下沉达到 0.57 mm; 结构与土体接触压力变化较大区域为湿陷区边缘的管廊底板处; 在管廊底部局部浸水发生不均匀沉降时, 结构受力形式表现为底板受拉, 顶板受压, 且越远离管廊中部, 所产生的应变越小, 拉压应变在湿陷区边缘发生转变; 地表也会发生沉降现象, 最大沉降值为 2.24 mm。试验结果可为湿陷黄土地区现浇管廊的设计和相关病害的防治提供参考。

关键词: 现浇管廊; 湿陷性黄土; 浸水湿陷; 地基沉降; 变形规律

中图分类号: TU431

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2024)02-0212-08

Experimental study on the influence of uneven settlement of loess foundation on cast-in-place pipe gallery

DENG Botuan, SHEN Chaofan, ZHENG Xiejun, FU Yifan

(School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: The uneven settlement of collapsible loess foundation after immersion will cause additional internal forces to the cast-in-place pipe gallery structure, resulting in cracking or even destruction of the pipe gallery structure, which seriously threatens its operation safety. In order to further study the influence of collapsible deformation of loess stratum on cast-in-place pipe gallery, a model test of local immersion collapsible loess stratum was carried out. In the test, the local immersion range was set, and the depth of foundation immersion was used as a variable to monitor the bottom displacement, soil contact pressure, surface strain and surface settlement of the pipe gallery structure, and its development trend was analyzed. The test results show that when the immersion depth of the local basement reaches 20 cm, the tunnel structure has obvious bending deformation in the immersion area, and the maximum subsidence of the structure in the collapsible area reaches 0.57 mm. The area where the contact pressure between the structure and the soil changes greatly is the bottom plate of the pipe gallery at the edge of the collapsible area. When uneven settlement occurs in the local immersion at the bottom of the pipe gallery, the stress form of the structure is that the floor is pulled and the roof is pressed, and the farther away from the middle of the pipe gallery, the smaller the strain is, and the tensile and compressive strain changes at the edge of the collapsible zone. The surface subsidence phenomenon also occurs, and the maximum settlement value is 2.24 mm. The test results of this paper can provide reference for the design of cast-in-place pipe gallery in collapsible loess area and the prevention and control of related disasters.

Key words: cast-in-place pipe gallery; collapsible loess; water immersion collapsibility; foundation settlement; law of deformation

收稿日期: 2022-11-22

修回日期: 2024-03-25

基金项目: 国家自然科学基金(42177155); 西部绿色建筑国家重点实验室开放基金(LSKF202323)

第一作者: 邓博团(1981—), 男, 博士, 高级工程师。主要从事土木工程防灾减灾工程与技术、岩土力学与工程应用方面的研究。E-mail: deng13720412121@139.com

通信作者: 申超凡(1998—), 男, 硕士生, 主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: 1534483993@qq.com

湿陷性黄土在我国西北部广泛分布，由于其浸水后易产生不均匀沉降^[1-3]，给修建于其中的工程带来许多挑战。作为城市的“生命线”，地下综合管廊的建设在城市地下空间的开发利用中发挥着巨大作用^[4-7]，随着管廊敷设范围越来越大，管廊的建设也将不可避免要穿越湿陷性黄土地层。西安已有部分区间管廊工程穿越了湿陷性黄土地层，其在施工阶段，周围土层因不具备湿陷条件，土层对管廊结构的影响不明显。但在管廊建成运营过程中，可能受强降雨裂隙入渗、附近河流渗水和地下水位变化等客观因素影响，使得管廊周围土体含水率增加，发生不均匀沉降。周围黄土潜在的不均匀沉降可能造成管廊结构受力改变，引起管体开裂等病害，严重威胁管廊的正常运营。

考虑到管廊工程与地下隧道工程同属地下工程，且他们在使用状态下所要应对的地质条件影响相似，所以利用隧道工程的研究成果对管廊结构的研究具有重要意义。范文等^[8]应用半无限弹性空间假设，求解得到黄土隧道地基发生湿陷时，压缩应力的计算方法。翁效林^[9-11]和王树明等^[11]通过室内模型试验，研究了黄土隧道地基不同程度浸水对地铁隧道结构的影响，结果表明隧道衬砌结构产生附加作用力的大小受黄土隧道地基湿陷范围大小的影响，非均匀湿陷引起的隧道周围土体不均匀沉降是隧道结构变形的主要原因；Weng 等^[12]又进一步利用数值模拟研究了不同浸水方式对隧道衬砌的影响。Xiao 等^[13]通过室内模型试验研究了纵向局部湿陷引起的地基沉降对隧道结构的影响，通过对拱顶竖向位移、围岩压力和衬砌应变的分析，得到浸水区的位置和范围是影响上述参数的主要因素。张玉伟等^[14]采用自主研发的可以模拟基底和地表浸水工况的模型箱，开展了隧道结构在不同浸水工况下的力学响应模型试验，分析了基底和地表浸水对地铁隧道结构影响的区别。邵生俊^[15]和 Li 等^[16]通过开展湿陷性黄土隧道场地地面浸水的现场试验，分析了黄土隧道场地的湿陷变形特征及其湿陷变形对隧道衬砌结构的影响。王立新等^[17]通过实例计算探究了地铁地下结构在周围黄土湿陷情况下其侧向和顶部土压力的变化规律。李俊^[18]通过其建立的荷载-结构模型分析方法，对不同地基浸水湿陷条件下衬砌结构的力学响应特征进行了分析。

地铁隧道与综合管廊虽同为地下结构，但由于埋深和截面的不同，地层浸水湿陷对两者的影响也有区别。管廊方面研究中，穆晓虎^[19]通过模

型试验和数值模拟，对预制管廊周围土层发生全幅均匀浸水和横向不均匀浸水下，结构的受力变形性能进行研究，指出不均匀浸水对管廊影响更大，且在此种工况下管廊甚至会发生拉伸破坏。徐强等^[20]通过使用 ABAQUS 软件建立有限元模型，分析了周围土体不同区域发生湿陷下管廊结构发生弯曲、扭转和弯扭三种变形时应对土体变形的适应能力，得出土体湿陷下管廊以弯曲变形为主时结构适应能力最差，以扭转变形为主时其适应能力最强。

综上可知，已有学者对预制管廊周围土层浸水后的受力性能进行了研究，但现浇管廊在该方面的相关研究较少。现浇管廊在施工工艺和结构构造上不同于预制管廊，且因其成熟的施工工艺和低廉的成本，在我国仍占据主导地位。由此，本文将展开现浇管廊在基底局部湿陷下的受力变形研究，通过模型试验，试图得到现浇管廊结构在该工况下的受力变形规律，为湿陷黄土地区现浇管廊的设计和相关灾害的治理提供参考。

1 模型试验设计

1.1 试验设计

本文选择西安某管廊项目为模型试验原型，根据该项目区段工程地质勘察报告，得到黄土的基本参数，如表 1 所示，模型试验的土层力学参数将以此作为参考依据。管廊原型为单舱管廊，采用明挖现浇施工工艺，混凝土等级为 C40，其对应的抗压、抗拉强度分别为 26.8 MPa 和 2.39 MPa，弹性模量为 3.45×10^4 MPa。管廊截面为 4 m×4 m，壁厚 0.27 m，管廊节段长 24 m，埋深 4.0 m。在本文的模型试验中，主要研究内容是地基局部湿陷对现浇管廊结构受力变形的影响，为方便模型试验的展开，对试验原型的管廊尺寸调整为 3.2 m×3.2 m，壁厚 0.24 m。

表 1 原状黄土基本参数
Tab. 1 Basic parameters of undisturbed loess

参数	内摩擦角 $\varphi/^\circ$	粘聚力 c/kPa	含水率 $W/\%$	压缩模量 $/\text{MPa}$
数值	25.2	30.11	15.1	6.4

利用量纲分析法并根据选定的物理量，结合将要使用的试验材料，同时考虑试验原型尺寸，对模型相似比进行拟定。取长度相似常数 $C_l=1:40$ ，预选用亚克力材料制作模型管廊，其弹性模量约为混凝土的 1/12，故弹性模量相似常数为 $C_E=1:12$ ，试验当中具体的物理量的相似关系见表 2。

表 2 模型试验相似常数

Tab. 2 Model test similarity constants

物理量	符号	相似关系	相似比
几何尺寸	l, h, d	C_l	1 : 40
含水率	ω	C_ω	1
弹性模量(管廊)	E	C_E	1 : 12
应变	ϵ	C_ϵ	1
应力	σ	$C_\sigma = C_E$	1 : 12
压缩模量	E_s	C_{E_s}	1 : 1
位移	u	$C_u = C_l$	1 : 40
内摩擦角	φ	C_φ	1
粘聚力	c	C_c	1

1.2 试验材料

(1)模型黄土材料

由试验的相似比设计,对试验所用模型土进行配置.根据前人对相关湿陷性黄土模型试验的研究结果^[21-22],确定模型土配置材料为黄土、膨润土、工业盐和氧化钙粉.通过调整石膏粉和工业盐的比例初步拟定 4 个模型土的配合比,并进行土工试验测量四种配比模型土的基本参数.最终确定本试验所用人工制备湿陷性黄土的最佳配比为:黄土 83%,膨润土 8%,工业盐 7%,氧化钙粉 2%.图 1 为模型土配置过程,模型土参数见表 3.

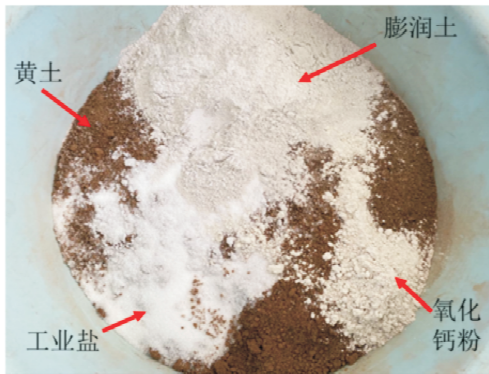


图 1 模型土配置

Fig. 1 Model soil configuration

表 3 原状黄土与模型土的参数对比

Tab. 3 Comparison of parameters between undisturbed loess and model soil

材料	含水率 $\omega/\%$	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/^\circ$	压缩模 量/ MPa
原状黄土	15.1	30.11	25.2	6.4
模型土	15.1	31.55	27.3	5.4

(2)管廊模型

管廊原型为明挖现浇的单舱管廊,其混凝土等级为 C40,由于模型试验主要研究地基层局部湿陷对现浇管廊结构受力变形的影响,同时为了试验

的更好操作,选择亚克力材料作为模型管廊的加工材料.综合考虑原型管廊的实际尺寸和试验条件等因素,按照已确定的几何相似比,制作长 600 mm,断面尺寸为 80 mm×80 mm,壁厚为 6 mm 的模型管廊,模型管廊见图 2.

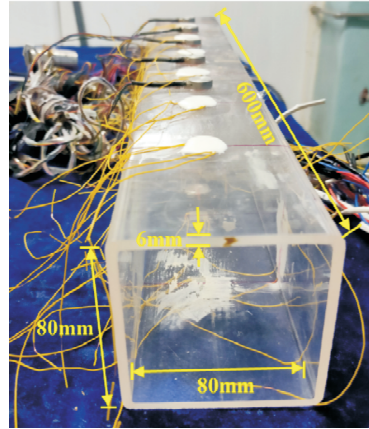


图 2 管廊模型

Fig. 2 Pipe gallery model

1.3 传感器布设

该模型试验中需要测量的值有管廊底部位移值、管廊表面应变值、管土接触压力值和地表沉降值.这些值通过电阻应变片、微型土压力盒、位移计和精密百分表进行采集量测.截面上微型土压力盒与应变片的布设如图 3、4 所示.

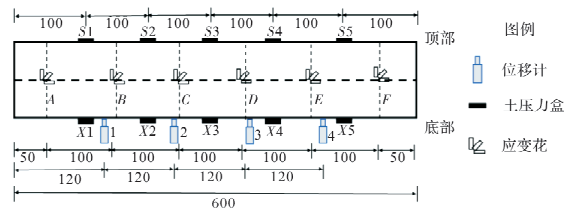


图 3 传感器布设示意图(mm)

Fig. 3 Sensor layout diagram /mm

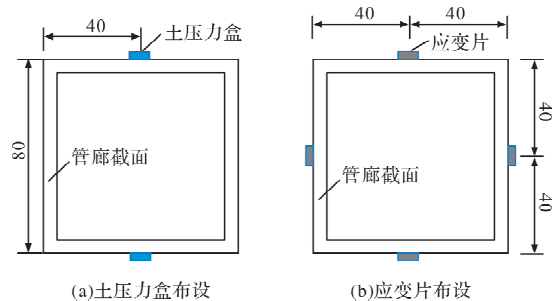


图 4 传感器布设(mm)

Fig. 4 Sensor layout /mm

1.4 试验工况设计

管廊工程在开挖和运营初期,其周围土层处于无水状态,围岩力学参数变化不大,但随其使用年限的增加,诸多因素均可能导致管廊周边地

层发生浸水，如由地下水渗流路径改变引起的地下水位上升；附近给排水管道泄漏造成管廊基底或周围土体浸水湿陷；地表强降水或生活用水下渗的影响。所以在后期运营中，管廊结构基底及其周围土体的含水率均可能发生改变，使基底发生湿陷及围岩土体压力增加，从而造成管廊结构受力改变或产生不均匀沉降等病害。

本次试验主要考虑管廊结构基底浸水(地下水位上升)工况，且考虑为局部上升。结合试验的几何相似比，设定管廊埋深为 10 cm(对应实际工程的 4 m)，管廊基底湿陷土层厚度取为 20 cm(相当于实际工程的 8 m)，水位上升高度设置为 20 cm(相当于实际工程 8 m)，且以 10 cm(对应 4 m)为一个阶段，分 2 次进行。模型试验的工况具体试验参数设置列于表 4，试验工况示意简图，见图 5。进行试验时，在设定的浸水范围边缘处设置一层隔水薄膜，尽可能保证试验中的湿陷区域与所设定湿陷区域的一致。

表 4 模型试验类型及参数
Tab. 4 Types and parameters of model tests

试验工况	浸水范围/cm		
	横向	深度	纵向
局部浸水	20	20	全幅

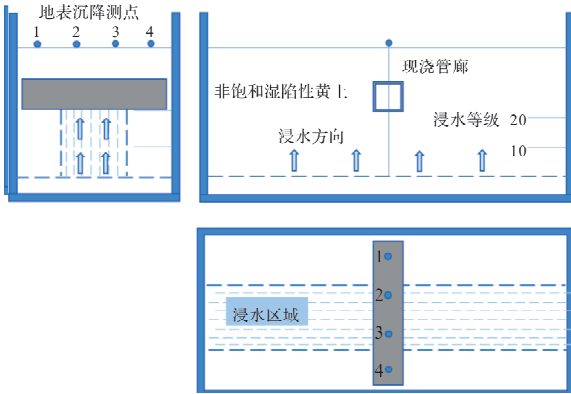


图 5 试验工况示意图
Fig. 5 Diagram of test conditions

1.5 试验过程

试验过程包括：模型土配制、填土、埋设水管及位移计、连接引线和百分表布置。模型土采用分层填筑压实，每层高度控制为 20 cm。试验设计浸水深度为 20 cm，试验中分两次进行注水，即第一次浸水达到 10 cm，间隔 12 小时后，再进行第二次浸水。根据模型箱尺寸，和单位土体浸水饱和所需水的质量，计算每次注水量为 3L。试验过程如图 6，7 所示。



图 6 填土完成
Fig. 6 Filling completed



图 7 数据采集过程
Fig. 7 Data acquisition process

2 试验结果分析

在试验过程中分别对位移计、土压力盒、应变片以及百分表数据进行采集，并进行整理和分析。

2.1 管廊结构底部位移

图 8 为基底局部持续浸水过程中管廊底部的位移曲线。

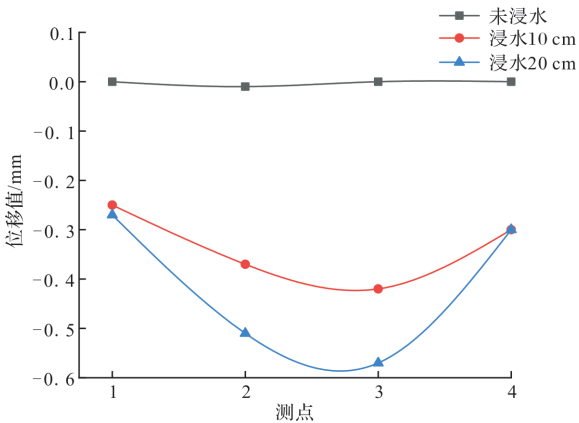


图 8 管廊底部位移曲线

Fig. 8 Displacement curve of pipe gallery bottom

在基底发生局部浸水时，随着浸水深度的增加，管廊结构也在发生下沉，并且发生了弯曲变形。当浸水达到 20 cm，管廊在位移计 1、4 测点位置下沉量较小，分别为 0.27 mm 和 0.30 mm；

而在位移计 2、3 测点位置下沉量较大,分别为 0.51 mm 和 0.57 mm;浸水 10 cm 时,位移计 2、3 测点位置下沉量分别为 0.37 mm 和 0.42 mm,位移大小均超过浸水 20 cm 时的 70%。通过管廊的底部位移曲线,分析认为,当管廊基底发生局部湿陷情况时,湿陷区承载力逐渐消失,而管廊上覆荷载并未改变,因此在湿陷区,管廊由于受力失衡发生下沉,而未湿陷区域地基承载力仍然在发挥抵制管廊下沉的作用,所以管廊在湿陷区发生了向下的弯曲变形。

2.2 管廊结构与土体接触压力

图 9 为在基底局部浸水条件下,管廊顶板和底板土压力的变化曲线。

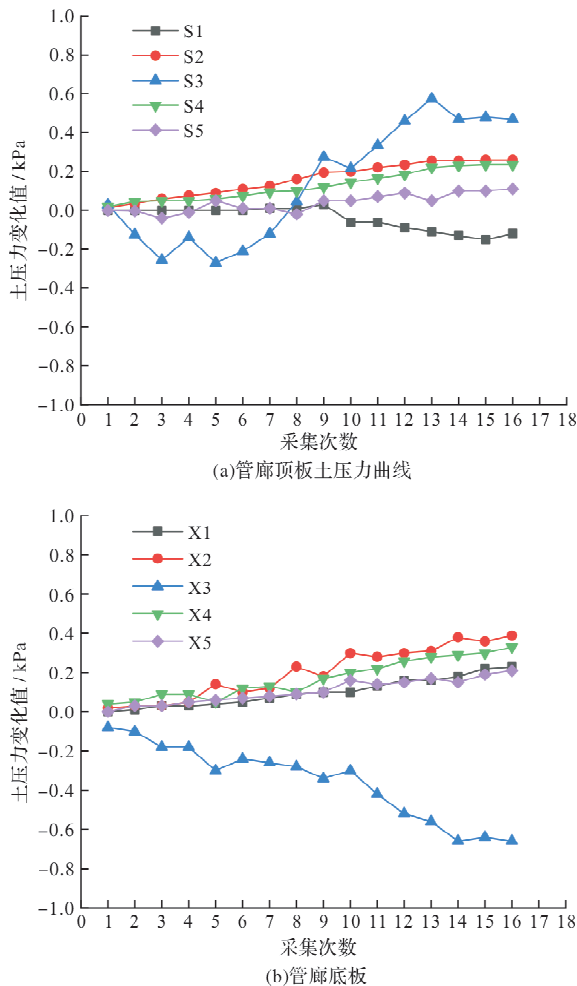


图 9 管廊顶板和底板土压力曲线

Fig. 9 Earth pressure curve of pipe gallery roof and floor

其中图 9(a)为顶板土压力变化曲线,由图可知,随采集次数的增加,也即浸水深度的增加,管廊顶面各测点土压力变化差异较大。当浸水达到 20 cm 后,顶板处管廊中部测点的土压力增加值最大,达到 0.47 kPa;距中部较近的两测点土压力增加值较大,为 0.26 kPa 和 0.24 kPa;端部

的测点土压力变化最小,为 0.11 kPa 和 -0.12 kPa。通过分析认为,当管廊基底发生局部湿陷时,未湿陷区域的上覆荷载变化均不大,管廊中部,也即湿陷区正上方土压力变化相对较大。造成这样的原因可能是由于湿陷使得管廊中部发生了向下形变,在结构变形过程中扰动了管廊结构上方土体,破坏了结构与土体间原有的平衡,使结构与土体的接触力发生了波动。

图 9(b)为底板土压力变化曲线,当浸水 20 cm 后,管廊底板土压力变化不同于顶板,底板土压力增加值最大的测点为管廊中部测点的附近两测点,最大值为 0.40 kPa;其次是端部测点,增加值分别为 0.22 kPa 和 0.24 kPa;中部的测点土压力降低最明显,为 -0.66 kPa。由此可知,当管廊基底发生局部湿陷时,湿陷区基底反力基本丧失,缺失的基底反力基本由湿陷区附近的地基来进行补偿,所以容易推测在湿陷区边缘处管廊易形成应力集中,应注意结构的加固,同时也应结合结构内力分析来验证判断。

2.3 管廊结构应变

(1)纵向应变

图 10 为管廊基底局部浸水作用下顶板和底板中轴线处的应变曲线。

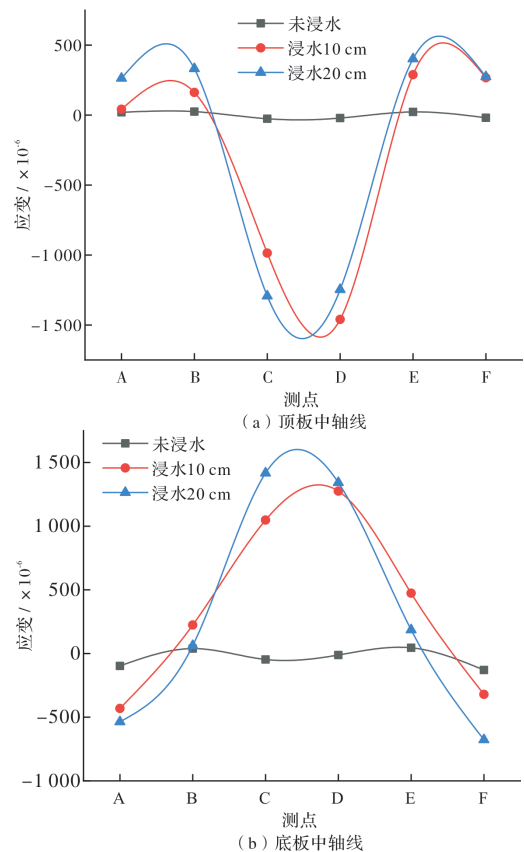


图 10 管廊结构纵向应变

Fig. 10 Longitudinal strain of pipe gallery structure

通过图 10(a)可以看出, 浸水 10 cm 时, 管廊结构顶板 A、B、E、F 截面测点产生拉应变, 且拉应变均较小, 分别为 42, 162, 289 和 267; C、D 截面测点处产生较大压应变, 分别为 -986 和 -1 460。随着浸水量增加至 20 cm, 各测点的数值均在原有基础上按原有趋势发生了少量的增长或少量波动, A、B、E、F 截面测点应变为 263, 332, 402 和 274; C、D 截面测点应变为 -1 293 和 -1 247(应变单位均为: $\times 10^{-6}$)。

由图 10(b)可以看出, 底板中轴线应变与顶板对应处应变基本相反。浸水 10 cm 时, 管廊结构底板 B、C、D、E 截面测点均发生了拉应变, 其中 B、E 截面测点的拉应变相对较小, 分别为 224 和 474; C、D 截面测点拉应变较大, 分别为 1 048 和 1 245。A、F 截面测点发生了小量的压应变, 其值分别为 -431、-321。随着浸水量增加至 20 cm, A、C、D、F 截面测点的数值均在原有基础上按照相同的趋势发生了少量的增长, B、E 截面测点则与原来的趋势相反, 有了少量的回落。C、D 截面测点增至 1 417、1 342; A、F 截面测点降至 -

536、-677; B、E 截面测点降至 62、186(应变单位均为: $\times 10^{-6}$)。

(2) 横向应变

图 11 给出了管廊 A、B、C、D、E、F 截面, 即距管廊左端分别为 50、150、250、350、450、550 mm 各截面的横向应变变化曲线。浸水深度为 10 cm 时, 横向应变变化已较明显, 这说明管廊结构底部地基湿陷对管廊结构应变有较大影响。随着浸水深度继续增加至 20 cm, 管廊结构应变在原来的趋势下继续增大, 增大速率较浸水 10 cm 时有所减小。从管廊结构所有环向应变变化来看, 管廊结构端部, 即距管廊左端 50 mm 和 550 mm 截面处, 其应变模式为顶板受拉, 底板受压, 左右侧板应变较小, 且基本对称; 在管廊结构靠近湿陷区边缘处, 即距管廊截面左端 150 mm 和 450 mm 截面处, 其各处应变方向与端部基本一致, 仍然为顶板受拉, 底板受压, 左右侧板基本对称; 处于湿陷区内的管廊结构其应变则与端部和湿陷区边缘处结构应变相反, 即顶板受压, 底板受拉, 左右侧板也以拉应变为主。

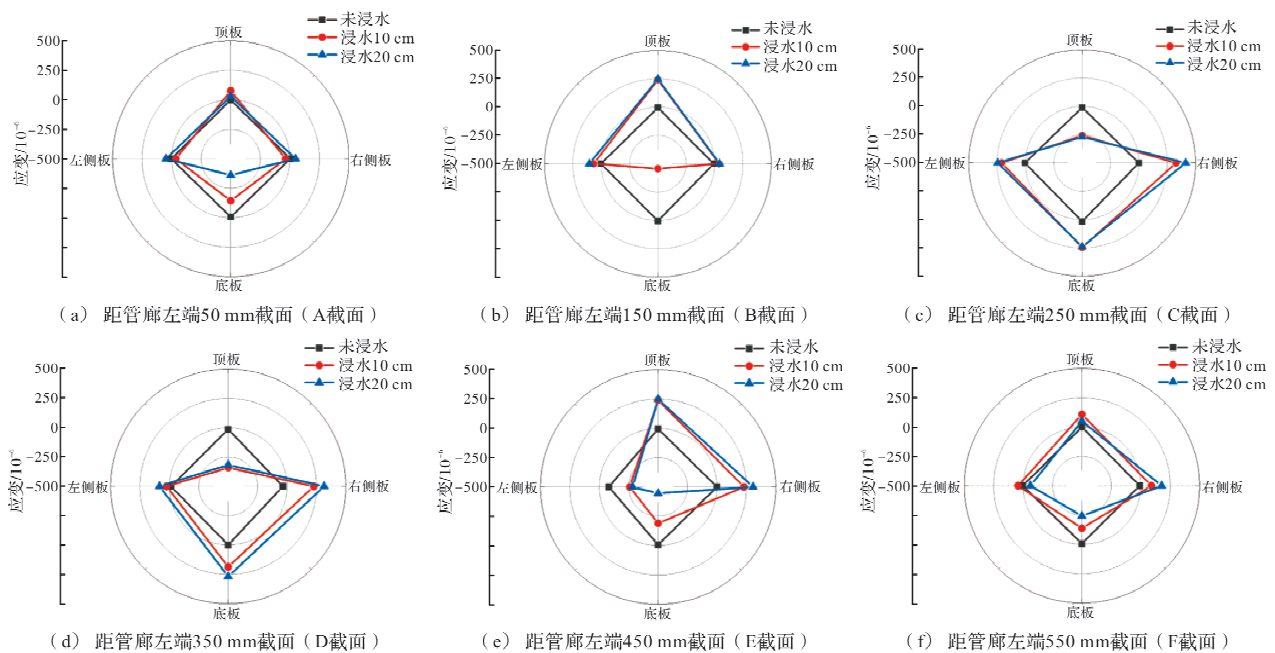


图 11 不同位置截面横向应变曲线

Fig. 11 Transverse strain curves at different positions

2.4 地表沉降分析

图 12 为基底局部浸水工况下的地表沉降曲线。从图中可以看出, 湿陷区上方地表沉降最大, 两侧随距湿陷区距离的增加逐渐减小。当浸水深度为 10 cm 时, 地表最大沉降值为 1.61 mm, 当浸水深度达到 20 cm 时, 地表的沉降值为 2.24 mm, 浸水深度 10 cm 时的地表沉降已经达到浸水

20 cm 的 70%。浸水区域沉降值大于未浸水区域, 未浸水区域, 即远离管廊中心的两侧点的沉降值分别为 0.972 mm 和 1.032 mm。地表在管廊基底局部湿陷工况下的最大沉降值与最小沉降值之差为 1.268 mm。说明管廊基底发生浸水不仅对管廊结构受力变形产生影响, 同时对地表, 甚至是路面结构构成威胁。

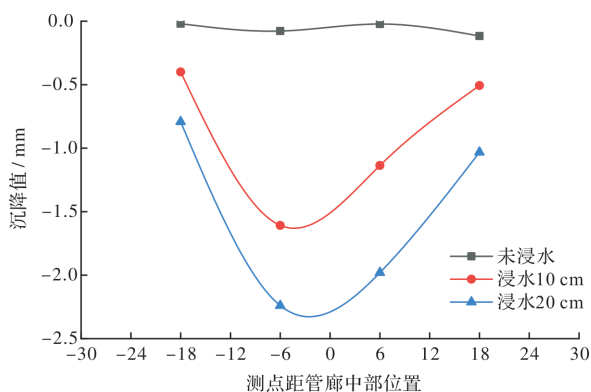


图12 地表沉降曲线

Fig. 12 Surface subsidence curve

3 结论

开展现浇管廊基底局部浸水湿陷的模型试验, 对其受力变形规律进行研究, 得到以下结论:

(1) 现浇管廊结构基底局部浸水湿陷过程中, 湿陷区域地基承载力逐渐减小, 管廊结构发生弯曲变形。当浸水深度达到 20 cm 时, 结构变形最大处在湿陷区内, 结构在该处的下沉达到 0.57 mm, 湿陷区边缘的结构底板处土压力增大明显;

(2) 随浸水深度的增加, 管廊表面应力应变状态表现为结构底板受拉, 顶板受压, 且越远离湿陷区中部, 结构的应变越小; 在湿陷区边缘处, 顶板处的压应变逐渐转化为拉应变; 同样, 底板处的拉应变逐渐转化为压应变;

(3) 由于管廊埋深较浅, 当其基底发生浸水时, 地表也会受其影响发生明显沉降, 所以当管廊基底浸水发生时, 也应注意地表路面的维护, 防止路基破坏和路面沉降。

参考文献 References

- [1] 郑建国, 邓国华, 刘争宏, 等. 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, 2015, 37(1): 165-170.
ZHENG Jianguo, DENG Guohua, LIU Zhenghong, et al. Study on the effect of discontinuous distribution of collapsible loess on collapsible deformation [J]. Geotechnical Engineering, 2015, 37(1): 165-170.
- [2] 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. A new understanding of loess collapsibility evaluation and residual collapsibility [J]. Geomechanics, 2014, 35(4): 998-1006.
- [3] AMIR A G, MOHSEN S H, ALI K, et al. Hydro-

- mechanical behavior of undisturbed collapsible loessial soils under different stress state conditions [J]. Engineering Geology, 2015, 195: 28-41.
- [4] JULIAN C P, JORGE C E, VICENTE C. Criticality and threat analysis on utility tunnels for planning security policies of utilities in urban underground space [J]. Expert Systems with Applications, 2013, 40: 4707-4714.
- [5] JULIAN C P, JORGE C E, VICENTE C. Strategic decision support system for utility tunnel's planning applying A'WOT method [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 55: 146-152.
- [6] VALDENEbro J V, GIMENA F N. Urban utility tunnels as a long-term solution for the sustainable revitalization of historic centres: The case study of Pamplona-Spain [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 81: 228-236.
- [7] 崔国静, 周庆国, 宋战平. 城市地下综合管廊建设与发展探析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2020, 52(5): 660-666.
CUI Guojing, ZHOU Qingguo, SONG Zhanping. Analysis on the construction and development of urban underground comprehensive pipe gallery [J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2020, 52(5): 660-666.
- [8] 范文, 邵生俊, 杨春鸣, 等. 黄土隧道地基湿陷压缩应力的计算方法[J]. 岩土工程学报, 2015, (S2): 80-85.
FAN Wen, SHAO Shengjun, YANG Chunming, et al. Calculation method of collapsible compressive stress of loess tunnel foundation [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2015, (S2): 80-85.
- [9] 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(8): 1374-1380.
WENG Xiaolin, WANG Jun, WANG Lixin, et al. Experimental study on the influence of soaking collapse of loess stratum on subway tunnel [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016(8): 1374-1380.
- [10] WENG Xiaolin, SUN Yufeng, ZHANG Yuwei, et al. Physical modeling of wetting-induced collapse of shield tunneling in loess strata [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 90: 208-219.
- [11] WENG X, ZHOU R, RAO W, et al. Research on subway shield tunnel induced by local water immersion of collapsible loess [J]. Nat Hazards, 2021, 108: 1197-1219.
- [12] 王树明, 梁庆国, 王二磊. 黄土地区地铁隧道不同湿陷变形方式模型试验系统的研制及应用研究[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(2): 157-162.

- WANG Shuming, LIANG Qingguo, WANG Erlei. Development and application of model test system for different collapsible deformation modes of subway tunnels in loess area [J]. Modern Tunnel Technology, 2020, 57 (2): 157-162.
- [13] XIAO Qinghua, LEI Shengxiang, CUI Kai, et al. Effect of the longitudinal local wetting-induced collapse on tunnel structure in loess strata [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 122: 104361.
- [14] 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 the influence of soaking collapse in thick loess stratum on subway tunnel [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38 (5): 1030-1040.
- [15] 邵生俊, 李骏, 李国良, 等. 大厚度湿陷性黄土隧道现场浸水试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40 (8): 1395-1404.
- SHAO Shengjun, LI Jun, LI Guoliang, et al. Field immersion test of collapsible loess tunnel with large thickness [J]. Geotechnical Engineering, 2018, 40(8): 1395-1404.
- [16] LI Jun, SHAO Shengjun, SHAO Shuai. Collapsible characteristics of loess tunnel site and their effects on tunnel structure [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 83: 509-519.
- [17] 王立新, 刘保健, 白阳阳. 湿陷性黄土与地铁地下结构相互作用机理研究[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(1): 72-78, 86.
- WANG Lixin, LIU Jianwei, BAI Yangyang. Study on interaction mechanism between collapsible loess and underground structure of subway [J]. Modern Tunneling Technology, 2019, 56 (1): 72-78, 86.
- [18] 李骏. 黄土隧道围岩湿陷与衬砌结构相互作用机制及其评价方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- LI Jun. Study on the interaction mechanism and evaluation method of loess tunnel surrounding rock collapse and lining structure [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.
- [19] 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 water immersion and collapsibility of loess strata on the stress and deformation of utility tunnel structure [D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [20] 徐强, 陈浩然, 李良成, 等. 黄土地层湿陷对整体管廊破坏作用研究[J]. 灾害学: 2022, 37(4): 23-29.
- XU Qiang, CHEN Haoran, LI Liangcheng, et al. Study on the destructive effect of collapsible loess stratum on the whole pipe gallery [J]. Hazards: 2022, 37 (4): 23-29.
- [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 the influence of loess stratum immersion on the mechanical properties of subway tunnel structure [D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.
- [22] 张延杰, 王旭, 梁庆国, 等. 人工制备强湿陷性黄土物理力学性质试验研究[J]. 兰州交通大学学报, 2015, 34 (6): 27-31.
- ZHANG Yanjie, WANG Xu, LIANG Qingguo, et al. Experimental study on physical and mechanical properties of artificially prepared strong collapsible loess [J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2015, 34 (6): 27-31.

(编辑 吴海西)