

# 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

张玉伟<sup>1,2</sup>, 宋战平<sup>1,2</sup>, 翁效林<sup>3</sup>, 谢永利<sup>3</sup>

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学 陕西省岩土与地下空间工程重点实验室, 陕西 西安 710055;  
3. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

**摘要:** 黄土力学特性对地层水环境变化极为敏感, 水敏性黄土地层浸水对工程结构影响明显。为系统研究大厚度黄土地层浸水对地铁隧道的影响, 自主研制可以再现基底和地表浸水工况的模型箱, 综合考虑浸水影响因素制定不同工况, 开展不同工况下隧道结构力学响应的模型试验, 分析黄土地层浸水对地铁隧道的影响机制, 建议湿陷性地基剩余湿陷量控制标准。结果表明: (1) 随浸水深度增加, 隧道基底和地表局部浸水均会引起土压力重分布, 受地层的荷载传递机制影响, 土压力变化趋势不均匀; 基底全幅浸水土压力随着浸水深度增加逐渐减小, 地表全幅均匀浸水土压力逐渐增大, 两者变化趋势相对均匀。(2) 基底局部浸水导致隧道地基局部承载力降低, 引起隧道衬砌弯矩发生不规则变化, 基底全幅均匀浸水导致隧道地基承载力均匀降低, 衬砌各点的弯矩变化相对均匀; 地表局部浸水隧道上方地层结构强度局部丧失, 荷载逐渐作用于隧道衬砌上引起衬砌弯矩快速增大, 地表全幅均匀浸水衬砌弯矩随着浸水深度的增加而增加。(3) 基底局部浸水和地表局部浸水时, 隧道发生了明显的水平位移和竖向位移; 基底全幅浸水和地表全幅浸水隧道主要以竖向位移为主, 水平位移不明显, 基底浸水引起的隧道位移比地表浸水更大, 局部不均匀浸水导致的差异沉降对隧道具有附加扭转作用, 对隧道整体受力更不利。(4) 当隧道基底湿陷地层为 30 cm 时, 仅仅湿陷 10 cm 对隧道整体影响不大, 允许有 10 cm 的剩余湿陷量, 建议湿陷性地基的处治深度为 20 cm。研究结果可为大厚度黄土地区地铁隧道前期设计及后期运营提供借鉴。

**关键词:** 土力学; 黄土; 地层浸水; 地铁隧道; 土压力; 模型试验

**中图分类号:** TU 43

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2019)05 - 1030 - 11

## Model test study on influence of the collapsibility of large thickness loess stratum on subway tunnels

ZHANG Yuwei<sup>1,2</sup>, SONG Zhanping<sup>1,2</sup>, WENG Xiaolin<sup>3</sup>, XIE Yongli<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Geotechnical and Underground Space, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China; 3. School of Highway, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China)

**Abstract:** The mechanical properties of loess are very sensitive to the change of the water content, and the immersion of water-sensitive loess stratum has obvious influence on its engineering structure. In order to study the

**收稿日期:** 2018 - 09 - 28; **修回日期:** 2018 - 11 - 10

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51578447); 西安建筑科技大学人才基金(RC1803); 中国博士后基金面上项目(2018M643809XB)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 51578447), Xi'an University of Architecture and Technology Talent Foundation (Grant No. RC1803) and Postdoctoral Funds in China(Grant No. 2018M643809XB)

**作者简介:** 张玉伟(1989 - ), 男, 2012 年毕业于长安大学公路学院, 现任讲师, 主要从事黄土地铁隧道方面的教学与研究工作。E-mail: 1032659676@qq.com。通讯作者: 宋战平(1974 - ), 男, 现任教授。E-mail: songzhp@xauat.edu.cn

**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2018.1141

influence of the collapsibility of large-thickness loess stratum induced by immersion on the subway tunnels, a model box which can reproduce the conditions of basement and surface immersion was developed, and the tests of tunnel mechanical response under different immersion conditions were carried out systematically. The influence mechanism of loess immersion on subway tunnels was studied, and the control standard of residual collapse settlement of the foundation was suggested. The results show that, with the increase of the immersion depth, the redistribution of the soil pressure around the tunnel will be caused by the local immersion of the foundation and the surface, and that the variation trend of the soil pressure is not uniform. The soil pressure decreases with the immersion depth under the condition of foundation all-range immersion but increases with the immersion depth in the case of surface all-range immersion. The change trend of the soil pressure of the both cases is relatively uniform. Foundation local immersion leads to a local decrease of the bearing capacity and hence, results in an irregular change of the bending moment of the tunnel lining. The uniform immersion of the whole basement leads to a uniform decrease of the bearing capacity, and the bending moment at each point of the tunnel lining changes relatively uniformly. The strength of the stratum above the tunnel losses partly due to local immersion, and the load gradually acts on the lining of the tunnel which causes a rapid increase of the bending moment of the lining. The bending moment increases with increasing the immersion depth under surface uniform immersion condition. The horizontal and vertical displacements of the tunnel are obvious when the foundation and the surface are partially immersed. When the foundation or the surface is fully immersed, the vertical displacement is predominant but the horizontal displacement is not obvious. The tunnel displacement caused by the foundation immersion is larger than that caused by the surface immersion. The differential settlement caused by the local uneven immersion will have an additional twisting effect on the tunnel, which is more harmful to the tunnel. When the collapsible layer of the tunnel foundation is 30 cm, only 10 cm of collapsible soil has little effect on the whole tunnel. It is suggested that the residual collapse settlement of 10 cm is allowed and the treatment depth of the collapsible foundation is 20 cm. The research results can be used for reference in the preliminary design and post operation of subway tunnels in large thickness loess area.

**Key words:** soil mechanics; loess; water immersion; metro tunnel; soil pressure; model test

## 1 引 言

湿陷性黄土广泛分布于我国西部地区, 尤其在陕西关中地区, 常常存在大厚度湿陷性黄土地层, 其局部厚度可达 30 m<sup>[1-2]</sup>。随着城市轨道交通不断完善, 不可避免地会在大厚度湿陷性黄土地层修建地铁, 此时应考虑黄土湿陷性对隧道的影响<sup>[3]</sup>。黄土具有明显的水敏性, 大量地下工程建设可能导致地层水环境发生变化(如地下水位改变、地下输水管线破裂、地表裂隙渗水等), 引起隧道结构周边黄土浸水湿陷, 威胁地铁运营安全<sup>[4-5]</sup>。西安远期规划超过 20 条地铁线路, 拟建地铁的某些区间位于大厚度湿陷性黄土地层中, 地铁建成后长期运营受各种因素影响导致水环境改变时, 会对地铁隧道结构造成明显影响, 黄土地铁隧道长期运营安全评价是一个急需解决的问题。

黄土地层湿陷性直接关系到工程安全, 目前已多有研究, 黄雪峰等<sup>[6-8]</sup>通过现场浸水试验, 探讨了

湿陷性地基处治深度与剩余湿陷量之间的关系; 苏立海等<sup>[9]</sup>依托现场浸水试验, 监测并分析了黄土地层水分运移规律; 王小军等<sup>[10]</sup>选取 8 个典型工点, 测试了郑西客运专线黄土地基湿陷性, 讨论了湿陷性黄土地基合理处治深度; 马 闫等<sup>[11]</sup>开展了大厚度湿陷性黄土打孔注水试验, 监测了水分扩散规律, 研究了浸水过程中黄土湿陷变形特性; 王铁行等<sup>[12]</sup>考虑卸荷作用, 讨论了黄土湿陷性评价方法, 推导了湿陷系数表达式; 张爱军等<sup>[13-14]</sup>开展了强烈自重湿陷性黄土的现场浸水试验, 研究了自重湿陷量、最大湿陷系数等演化特征; 李喜安等<sup>[15]</sup>开展了黄土湿陷的渗透试验, 揭示了黄土湿陷对渗透系数的影响规律; 张 耀等<sup>[16]</sup>提出了黄土结构改良的概念, 研究了酸性溶液对黄土湿陷性的改良效果。

鉴于黄土特殊性质, 黄土湿陷性对地铁隧道的影响也越来越受到重视, 一些学者已开展了相关研究, 邵生俊等<sup>[17-18]</sup>首先进行了隧道岩土环境等级和浸水等级划分, 明确指出隧道穿越自重湿陷性黄土时可能受到地基湿陷变形附加作用而破坏, 研究了

附加应力计算方法, 基于隧道施工围岩稳定和地层浸水湿陷造成的衬砌附加荷载变化 2 个关键问题, 建议了黄土隧道湿陷性地基浸水不均匀变形评估方法以及上覆围岩压力的确定原则; 翁效林等<sup>[19]</sup>改进了离心机浸水装置和监测设备, 通过离心模型试验研究了地层湿陷引起隧道结构的力学响应; 张玉伟和翁木生<sup>[20]</sup>采用离心试验分析了黄土地层浸水条件下, 桩基荷载对地铁隧道的影响规律, 并探讨了荷载传递机制; 郑甲佳和赵可<sup>[21]</sup>采用数值软件, 建立了施工和浸水 2 种工况的计算模型, 分析了黄土围岩浸水对隧道周围土体和衬砌结构稳定性的影响。可以看出, 目前关于黄土浸水力学特性的研究比较充分, 但黄土地层浸水引起隧道工程问题研究尚比较少见。随着黄土地区地铁工程的大量建设, 黄土地层浸水对地铁隧道结构的影响关系着后续运营安全, 也越来越受到重视, 但目前关于黄土地层浸水湿陷对地铁隧道的影响机制尚不明确, 无论是周边浸水导致的围岩承载能力降低, 还是基底浸水导致的不均匀沉降, 均会对隧道造成不利附加荷载, 如何评价其对隧道影响程度尚需开展系统的研究。

本文依托西安快速轨道交通临潼线大厚度湿陷性黄土地铁区间, 鉴于线路地下线转地上线存在深浅埋的实际情况, 同时充分考虑地层潜在浸水因素, 设计浅埋地表浸水和深埋基底浸水共 4 组工况, 采用相似模型试验手段开展研究, 系统分析不同地层浸水工况黄土地铁隧道结构受力特性, 讨论其影响机制, 建议基底湿陷性地基的剩余湿陷量控制标准, 以期为黄土地区地铁隧道的前期设计及后期运营评价提供依据。

## 2 模型试验设计

### 2.1 工程概况

西安快速轨道交通临潼线长约 25.919 km, 全线以地下线为主, 地面线为辅, SYXLTKC-3 标包括紫霞一路、芷阳五路、芷阳广场 3 座车站及 4 个区间, 线路正线长度约 6 660 m, 本段线路紫霞三路—芷阳五路为地面线, 芷阳广场—大学城为地下线, 线路概况如图 1 所示, 本文依托芷阳广场—大学城的地下线为主要研究对象, 该区段湿陷性黄土厚度较大, 最大湿陷性黄土层将近 30 m, 地铁线埋深最浅处只有不到 7 m, 最深处超过 25 m, 且勘测结果表明当前地下水位低于地铁结构底板, 但不能保证将来地下水位不发生变化, 另外此区间段由于地面线转地下线, 导致某些隧道区间埋深较浅, 受



图 1 线路走向

Fig.1 Subway line direction

地面水源影响的可能性较大, 因此考虑最不利工况影响, 需研究深埋条件下基底浸水和浅埋条件下的地表浸水 2 种不同浸水工况对隧道结构受力及变形的影响机制。

### 2.2 模拟工况设计

隧道开挖及建成运营初始阶段隧道周围地层处于无水状态, 围岩力学参数变化不大, 可认为隧道处于健康安全状态, 但随着运营年限的增加, 多种因素可能引起隧道周边地层浸水恶化, 如地下工程建设造成地下水渗流路径改变, 引起地下水位上升; 附近河道及地下暗河中的水向隧道部位渗流; 隧道开挖形成汇水区, 裂隙水向隧道处汇集; 浅埋隧道可能受到地表强降水或生活用水排放引起裂隙渗水的影响。因此, 地铁隧道长期运营中, 隧道基底和隧道周边及上部的黄土含水率等各项指标均可能发生改变, 导致基底发生不均匀湿陷, 上部围岩自承能力降低, 加大对隧道的附加荷载, 最终造成隧道结构受力不均匀或不均匀沉降等病害, 湿陷性黄土地铁隧道基底及周边围岩浸水对隧道结构受力和变形的影响机制尚不清晰, 开展不同工况黄土地层浸水对隧道结构的影响研究具有重要意义。

本次试验主要考虑深埋隧道基底浸水(地下水位上升和地下暗河)和浅埋隧道地表浸水(河道或地表强降水)2 种工况, 2 种情况又分别考虑局部不均匀浸水, 及全幅均匀浸水。基底浸水考虑地下水全幅均匀上升和局部不均匀上升 2 种情况, 隧道埋深设定为 50 cm(相当于原型 15 m), 隧道基底湿陷土层取 30 cm(相当于原型 9 m), 水位上升高度分别考虑为 10, 20, 30 cm(相当于原型 3, 6, 9 m)。具体基底浸水工况设计图见图 2, 基底浸水工况参数如表 1 所示。

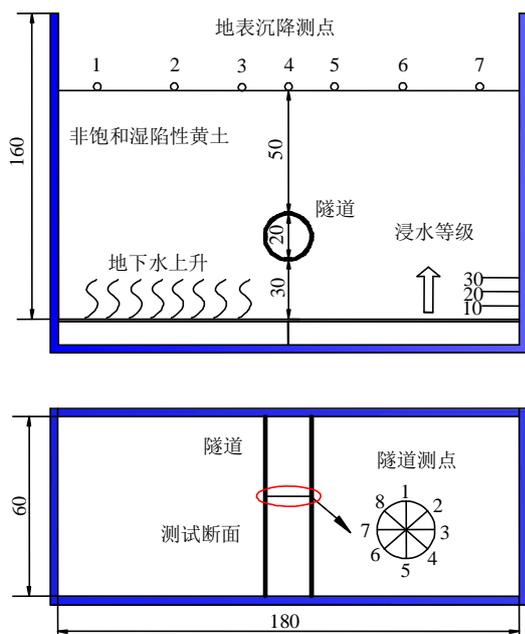


图 2 基底浸水工况设计图(单位: cm)

Fig.2 Diagram of foundation immersion(unit: cm)

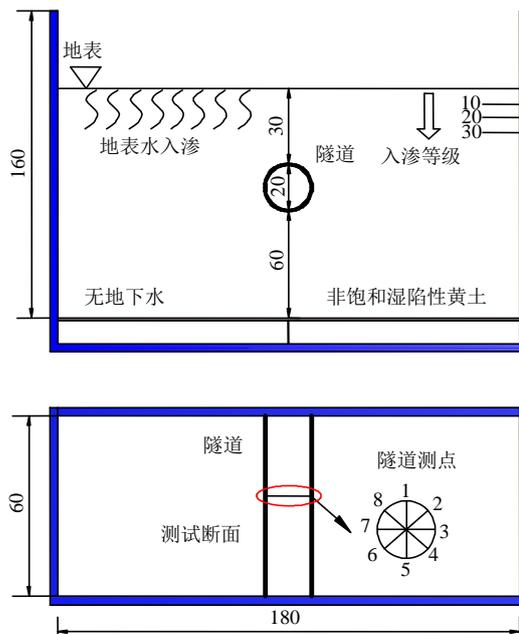


图 3 地表浸水工况设计图(单位: cm)

Fig.3 Diagram of ground surface immersion(unit: cm)

表 1 基底浸水试验工况

Table 1 Conditions of foundation immersion

工况	浸水方式	隧道埋深/m	浸水深度/m	测试项目
JDGK1		15(50 cm)	3(10 cm)	
JDGK2	局部	15(50 cm)	6(20 cm)	土压力
JDGK3		15(50 cm)	9(30 cm)	弯矩
JDGK4		15(50 cm)	3(10 cm)	地表沉降
JDGK5	全幅	15(50 cm)	6(20 cm)	隧道位移
JDGK6		15(50 cm)	9(30 cm)	

注: 表中括号内数值为对应的模型参数, 下同。

当隧道埋深较浅时, 由于隧道开挖临空面的汇水效应导致地表降水及周围河道渗水会往隧道处集聚, 可能导致黄土围岩的强度和承载力急剧降低, 此时作用于隧道衬砌结构的荷载大大增加, 一方面对隧道结构受力造成不利影响, 另一方面增大隧道基底的附加荷载, 引起更大的沉降变形, 造成隧道结构破损等病害。地表浸水主要考虑局部不均匀浸水和全幅均匀浸水 2 种情况, 隧道整体埋深设定为 30 cm(相当于原型 9 m), 隧道底板下湿陷性土层厚度设定为 60 cm(相当于原型 18 m), 浸水深度分别考虑为 10, 20, 30 cm(相当于原型 3, 6, 9 m)。地表浸水工况设计见图 3, 具体参数列于表 2 中。

通过隧道受力和位移监测来评价地层浸水湿陷的影响程度, 测试项目包括衬砌土压力、弯矩、隧道整体位移及基底浸水的地表沉降, 其中土压力测点均匀分布于隧道周边(P1~P8), 土压力通过微型

表 2 地表浸水试验工况

Table 2 Conditions of ground surface immersion

工况	浸水方式	隧道埋深/m	浸水深度/m	测试项目
DBGK1		9(30 cm)	3(10 cm)	
DBGK2	局部	9(30 cm)	6(20 cm)	土压力
DBGK3		9(30 cm)	9(30 cm)	弯矩
DBGK4		9(30 cm)	3(10 cm)	隧道位移
DBGK5	全幅	9(30 cm)	6(20 cm)	
DBGK6		9(30 cm)	9(30 cm)	

土压力盒量测, 弯矩测点同土压力, 通过隧道内、外表面的应变片测得, 通过衬砌内、外表面的应变读数换算即可得到测点处弯矩值, 换算公式为

$$M = E(\epsilon_i - \epsilon_e)bh^2 / 12 \quad (1)$$

式中:  $b$  为单位长度,  $h$  为衬砌厚度,  $E$  为衬砌弹性模量,  $\epsilon_i$  为衬砌内表面应变值,  $\epsilon_e$  为衬砌外表面应变值。

由于测试断面位于土体内部, 断面的位移测试存在一定困难, 考虑到本文研究假定为平面应变问题, 因此近似认为模型箱表面断面的位移近似等于中间测试断面的位移, 采用此断面的位移来表征不同浸水工况引起的隧道位移。隧道位移通过划定网格线作为参考坐标, 试验不同浸水高度分别实时照相, 然后通过 GetData 软件提取得到不同浸水高度的位移值, 地表沉降通过精密千分表量测。

为满足不同试验工况要求, 自主设计浸水试验模型箱<sup>[22]</sup>, 试验模型箱分别设置了下部浸水和上部

浸水装置，能够实现试验中基底浸水和地表浸水的多工况模拟(见图4)，地表浸水通过浸水管控制，基底浸水通过浸水箱控制，两者均通过模型箱刻度标线精确控制浸水高度。

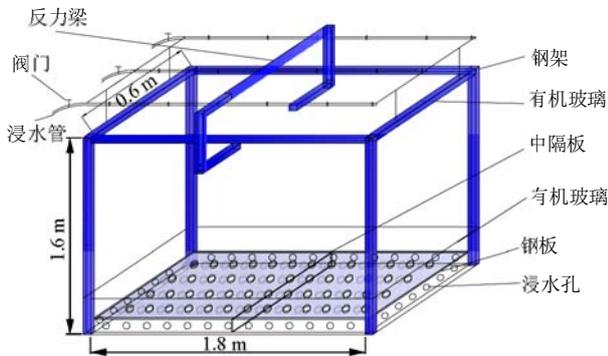


图4 浸水试验模型箱

Fig.4 Immersion model box

2.3 相似法则

本次试验模型箱尺寸为 1.8 m(横向长)×0.6 m(纵向宽)×1.6 m(竖向高)，取模型试验相似比例  $n=30$ ，根据量纲分析法<sup>[23]</sup>，分离出应力和位移的函数表达式为

$$\sigma = f_1(L, F, \gamma, E, \mu, \varepsilon, \omega) \quad (2)$$

$$\delta = f_2(L, F, \gamma, E, \mu, \varepsilon, \omega) \quad (3)$$

判据方程为

$$\frac{\sigma}{F} = g_1\left(\frac{L\gamma}{F}, \frac{E}{F}, \mu, \varepsilon, \omega\right) \quad (4)$$

$$\frac{\mu}{L} = g_2\left(\frac{L\gamma}{F}, \frac{E}{F}, \mu, \varepsilon, \omega\right) \quad (5)$$

建立以下相似条件:

$$C_\sigma = C_\gamma C_L = n, C_\delta = C_\varepsilon C_L = n, C_E = C_\sigma = n \quad (6a)$$

$$C_\varepsilon = 1, C_\phi = 1, C_\mu = 1 \quad (6b)$$

式中： $\sigma$ 为应力， $\varepsilon$ 为应变， $\delta$ 为位移， $E$ 为弹性模量， $\gamma$ 为容重， $\mu$ 为泊松比， $c$ 为黏聚力， $\phi$ 为内摩擦角， $l$ 为长度， $C_\sigma$ 为应力相似比， $C_l$ 为几何相似比， $C_\varepsilon$ 应变相似比， $C_\omega$ 为含水率相似比， $C_\mu$ 为泊松比相似比， $C_\delta$ 为位移相似比， $n$ 为模型比。制定模型试验相似关系如表3所示。

2.4 模型材料

原则上采用原状黄土开展试验最理想，但由于模型较大，现场取样原状土存在困难，因此通过现场取土配制与原状黄土具有相似性质的人工制备湿陷性黄土开展试验<sup>[23-24]</sup>，原状黄土和人工制备黄土物理力学参数如表4所示，所配制黄土主要考虑湿陷性满足相似要求，土样的压缩性对试验结果影响

表3 相似模型试验各物理量之间的相似比例关系

Table 3 Scaling law of parameters

物理量名称	量纲	相似关系	相似比(原型/模型)
长度	L	$C_L$	30
相对密度	$FL^{-3}$	$C_\gamma$	1
弹性模量	$FL^{-2}$	$C_E = C_\sigma$	30
泊松比	1	$C_\mu$	1
含水率	1	$C_\omega$	1
应力	$FL^{-2}$	$C_\sigma$	30
应变	1	$C_\varepsilon$	1
位移	L	$C_\delta$	30

表4 原状黄土和人工制备黄土基本参数

Table 4 Parameters of original and artificial loesses

材料	相对密度 $G_s$	密度/ 密度/ $(g \cdot cm^{-3})$	含水 率/ 率/ %	黏聚力 $c/kPa$	内摩擦 角 $\phi(^{\circ})$	压缩 模量/ 模量/ MPa	塑 限	液 限	塑限 指数
原状黄土	2.72	1.52	14.1	30.66	28.2	12.6	16.2	27.3	11.1
人工制备黄土	2.71	1.56	14.1	31.67	27.4	5.45	16.3	25.8	9.5

不大，湿陷系数对比如表5所示，试验表明人工制备黄土能够基本满足试验要求。由于主要考虑隧道建成后地层浸水的影响，忽略管片拼装等过程，隧道模型由有机玻璃管一次加工成形(见图5)，其弹性模量为 1.17 GPa，泊松比为 0.3，模型管直径拟为 200 mm，壁厚 10 mm，内径 180 mm，根据抗弯刚度等效原则<sup>[19]</sup>，横向受弯条件下，模型与原型隧道管片厚度的弯矩比尺关系为

$$E_m I_m = n^{-3} E_p I_p \quad (7)$$

式中： $n$ 为模型比； $E_m$ ， $I_m$ 分别为离心模型隧道管片的弹性模量与横截面惯性矩； $E_p$ ， $I_p$ 分别为原型隧道管片的弹性模量与横截面惯性矩。横截面惯性矩计算式为  $I = t^3 / 12$ (其中  $t$ 为隧道管片厚度)，因此有机玻璃材质隧道模型相当于原型中厚度为 300 mm 的混凝土管片盾构隧道(弹性模量为 35 GPa)。

表5 湿陷系数对比

Table 5 Comparison of collapsibility coefficient

材料	湿陷系数				
	$P = 50 \text{ kPa}$	$P = 100 \text{ kPa}$	$P = 200 \text{ kPa}$	$P = 300 \text{ kPa}$	$P = 400 \text{ kPa}$
人工制备黄土	0.034	0.064	0.059	0.048	0.045
原状黄土	0.035	0.058	0.054	0.044	0.041

2.5 试验过程

首先制备足够的人工湿陷性黄土备用，由于本

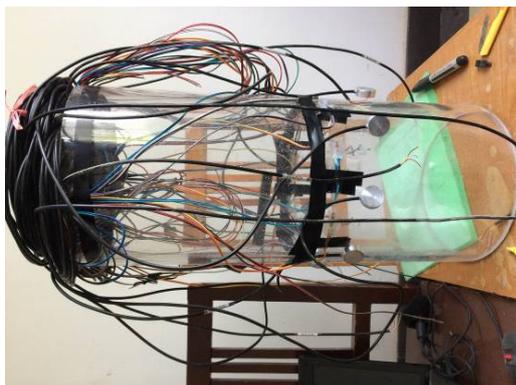
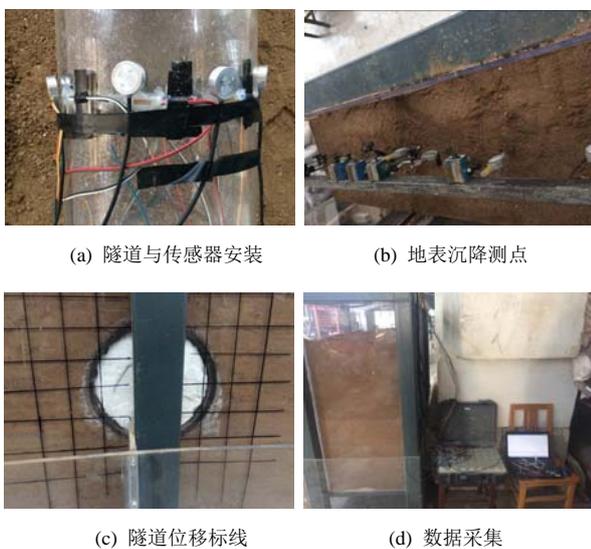


图 5 隧道模型和传感器

Fig.5 Tunnel model and sensors

文主要考虑的是隧道建成运营后，黄土地层湿陷对地铁隧道的影响，因此不考虑施工过程，隧道模型采用预埋式设置。模型土采用分层填筑压实，每层高度控制为 20 cm，隧道模型与传感器按照不同试验工况预埋在设计高度处，传感器导线连接数据采集系统。模型箱表面设定位移标线，以便观测不同阶段隧道位移，对于基底浸水工况，在地表设置沉降监测点，实时观测地表沉降情况。模型安装完毕后调试测试元件，随后开始不同工况的浸水试验。试验过程如图 6 所示。



(a) 隧道与传感器安装

(b) 地表沉降测点

(c) 隧道位移标线

(d) 数据采集

图 6 试验过程

Fig.6 Process of test

### 3 试验结果分析

#### 3.1 隧周土压力

图 7 给出了不同浸水工况下土压力变化规律。图 7(a)为基底局部浸水隧道土压力演化规律，随着浸水深度的增加，隧周各测点土压力逐渐发生变化，浸水 10 cm 时测点 5 土压力逐渐减小，其余测点变

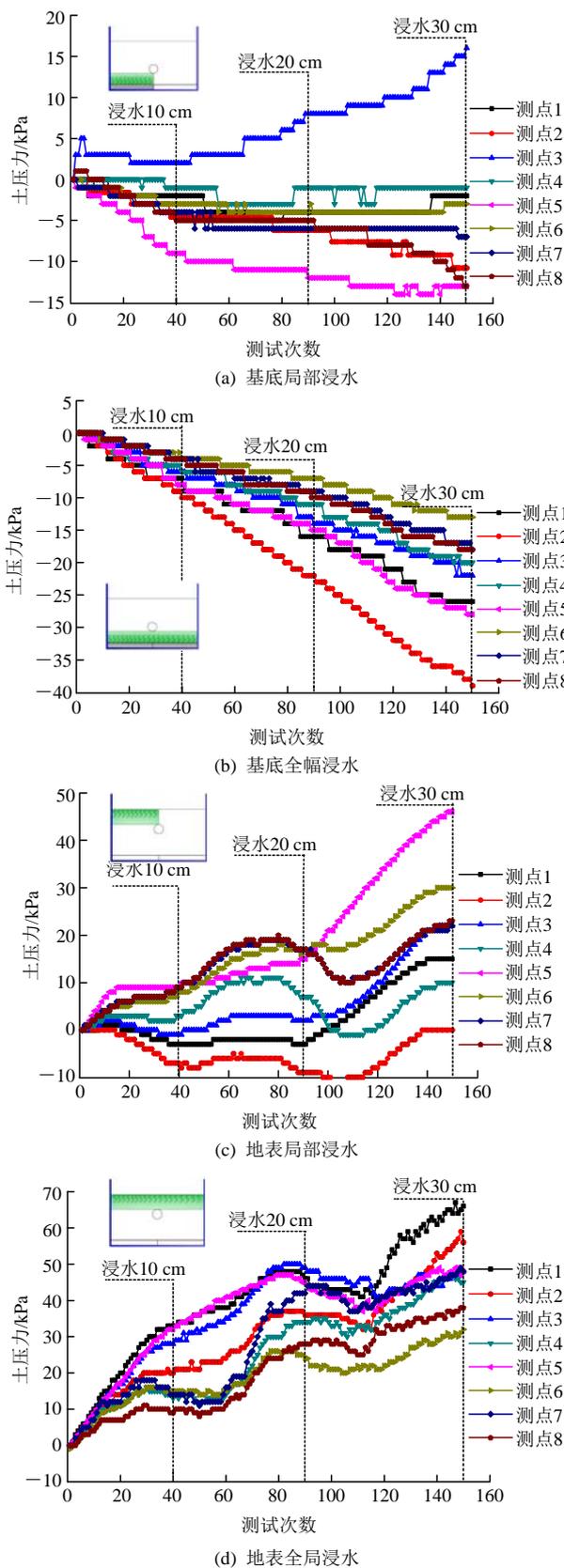


图 7 不同工况下的土压力

Fig.7 Soil pressure under different test conditions

化不明显；浸水 20 cm 时测点 3 土压力有所增大，其余测点有所减小，但减小不明显；浸水深度 30 cm 时测点 3 土压力进一步增大，测点 2 和测点 8 有所

减小，其余测点减小不明显。说明隧道基底局部浸水引起隧周土压力重分布，随浸水深度增加，受土层的荷载传递机制，土压力变化趋势有所改变。图 7(b)为基底全幅浸水土压力演化规律，可以看出，随着浸水深度的增加，土压力逐渐减小，且变化趋势相对均匀。分析认为，地基浸水承载力降低，隧道与地基之间的接触压力减小，对于处于平衡状态的隧道来说，土压力减小对隧道受力也是不利的。

图 7(c)为地表局部浸水隧道土压力演化规律，可以看出，随着浸水深度增加，隧周各点土压力逐渐发生变化，浸水 10 cm 时，测点 5、6 和 8 土压力有所增大，测点 2 土压力有所减小，其余测点变化不大；浸水 20 cm 时，测点 5、6 和 8 土压力进一步增大，其余测点变化不明显；浸水 30 cm 时，所有测点土压力均有增大趋势，测点 5 增大尤为明显。图 7(d)给出地表全幅浸水隧道土压力演化规律，随着浸水深度的增加，隧道周边土压力均逐渐增大，测点 1 和 2 增大相对明显。地表局部浸水引起隧道周边土压力变化不均，可能给隧道带来附加弯矩作用，地表全幅浸水土压力值虽然较大，但变化趋势相对均匀，可能对隧道的危害反而更小。

### 3.2 衬砌弯矩分析

图 8 为不同工况下隧道衬砌弯矩变化规律。图 8(a)给出基底局部浸水衬砌弯矩演化规律，初始浸水阶段，衬砌弯矩变化较小，测点 4 和 6 弯矩略微减小，其余测点弯矩有所增加，随着浸水深度的增加，测点 6 进一步减小，其余测点均有增加趋势。基底局部浸水导致隧道地基局部承载力降低，导致隧道衬砌弯矩发生不规律变化。图 8(b)给出了基底全幅均匀浸水衬砌弯矩演化规律，随着浸水深度的增加，衬砌弯矩变化绝对值均逐渐增大，初始浸水阶段衬砌弯矩变化相对较小。随着浸水深度的增加弯矩变化逐渐明显，其中测点 2 和 5 弯矩略微减小，其余测点弯矩均有所增加，测点 1 增加趋势最明显。

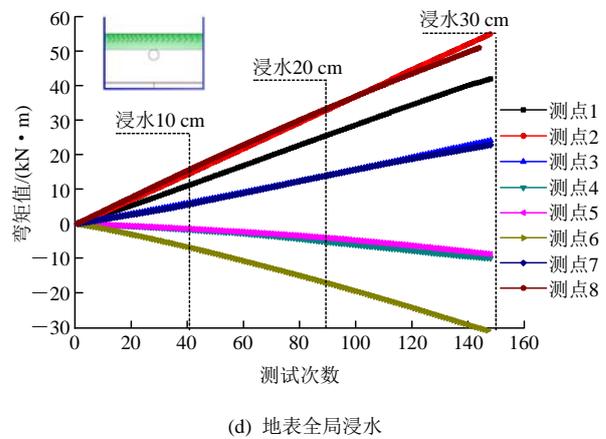
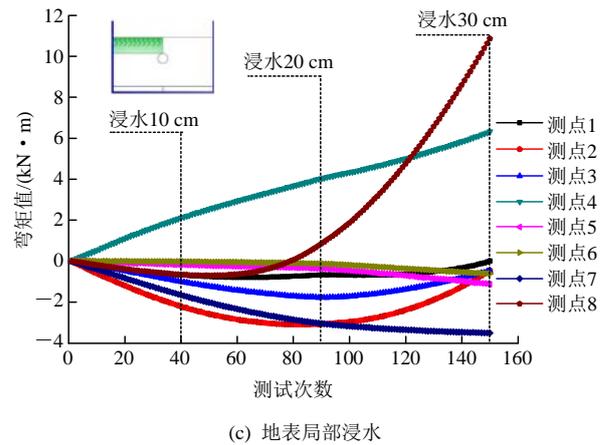
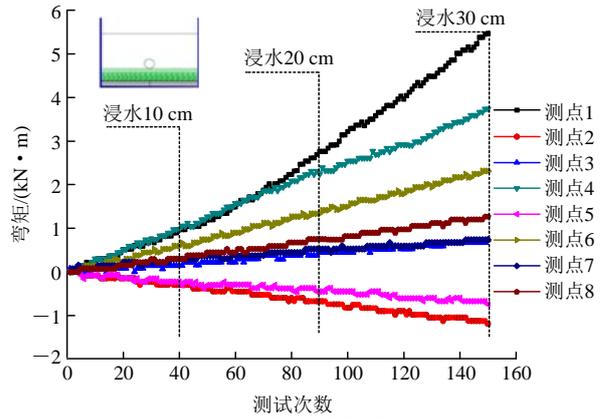
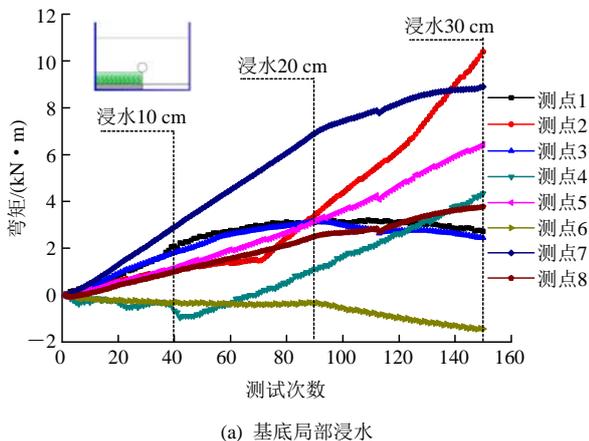


图 8 不同工况下的弯矩

Fig.8 Bending moment under different test conditions

基底全幅均匀浸水导致隧道地基承载力均匀降低，衬砌各点的弯矩变化相对均匀。

图 8(c)为地表局部浸水衬砌弯矩演化规律，初始浸水阶段，各点弯矩变化较小，随着浸水深度增加，弯矩变化逐渐明显，测点 4 和 8 逐渐增大，其余测点先略微减小后有增大趋势，浸水深度达到 30 cm 时，测点 8 弯矩快速增大，由于隧道上方地层局部浸水结构强度完全丧失，荷载完全作用于隧道衬砌上引起的。图 8(d)给出地表全幅均匀浸水衬砌弯矩演化规律，随着浸水深度的增加，衬砌弯矩绝对

值均匀变大，当浸水深度达到 30 cm 时，隧道上方地层完全浸水湿陷，隧道拱效应完全消失，土层压力完全作用于隧道，造成衬砌弯矩变化较大。

### 3.3 隧道整体位移

本试验可看作平面应变问题，以模型箱表面处断面位移代表测试断面的位移。图 9 给出不同浸水工况下隧道位移情况。图 9(a)为基底局部浸水时隧道位移变化规律，随着浸水过程隧道发生了明显的水平位移和竖向位移，浸水深度为 10 cm 时，隧道水平位移为 2.5 mm，竖向位移为 4.4 mm；随着浸水深度的增加，隧道整体位移逐渐明显，当浸水深度为 30 cm 时，隧道水平位移达到 8.6 mm，隧道竖向位移达到 19.2 mm。图 9(b)为基底全幅浸水时隧道位移变化规律，隧道整体主要以竖向位移为主，浸水深度 10 cm 时，隧道竖向位移为 6 mm，水平位移不明显；随着浸水深度增加到 30 cm，隧道竖向位移逐渐增加到 22.2 mm，水平位移仍然不明显。图 9(c)为地表局部浸水时隧道位移变化规律，可看出隧道发生明显的水平位移和竖向位移，浸水 10 cm 隧道整体位移不明显，水平位移为 0.6 mm，竖向位移为 0.8 mm；随着浸水深度的增加，隧道整体位移逐渐明显，浸水 30 cm 时隧道水平位移达到 3.8 mm，竖向位移达到 6.6 mm，局部浸水时隧道上方围岩并未完全破坏，仍具有一定的自承能力，此工况导致的隧道位移小于其他 3 种工况。图 9(d)为地表全幅浸水时隧道位移变化规律，可看出隧道以

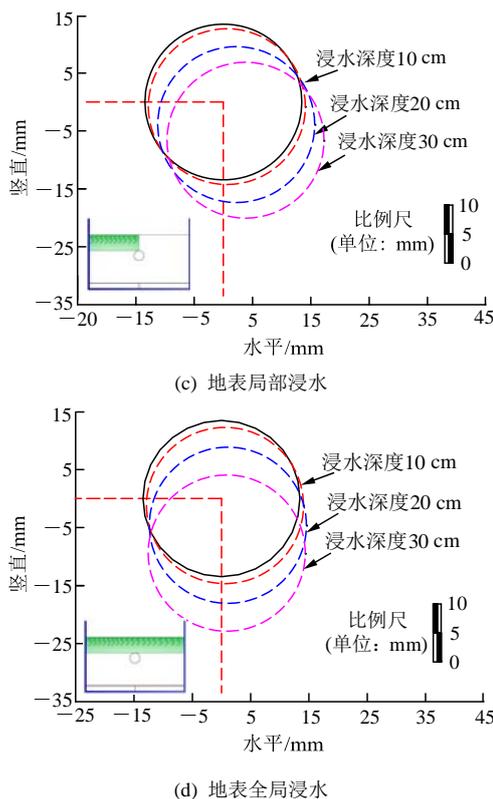


图 9 不同工况下的隧道位移

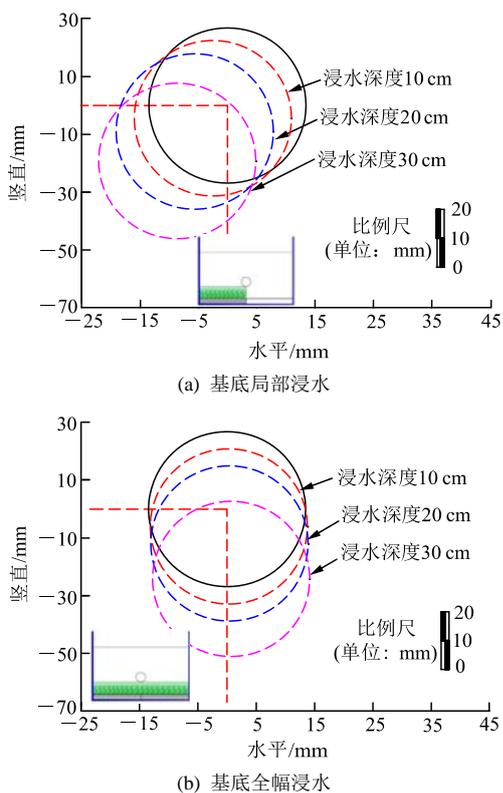
Fig.9 Tunnel displacement under different test conditions

竖向位移为主，浸水 10 cm 时位移较小，竖向位移为 1.2 mm；浸水 30 cm 时位移显著增大，竖向位移达到 9.4 mm。综上所述，基底浸水引起的隧道位移比地表浸水更大，局部不均匀浸水会引起明显的水平位移，全幅均匀浸水引起的位移主要以竖向位移为主。

本文还测试了隧道基底浸水工况下的地表沉降变化规律。图 10(a)给出了基底局部浸水地表沉降演化规律，可看出基底浸水不光引起隧道整体位移还会导致明显的地表沉降，随着浸水深度的增加，地表沉降值随之增大。浸水 10 cm 时，地表沉降不明显，浸水 30 cm 时，地表沉降最大值位于隧道正上方，达到 19 mm。由于基底局部浸水导致地表沉降不均匀，浸水一侧地表沉降值大于非浸水一侧；图 10(b)给出了基底全幅均匀浸水地表沉降演化规律，浸水 10 cm 时地表沉降较小，且相对均匀，随着浸水深度增加到 30 cm，地表沉降值逐渐变大，最大值达到 21 mm。基底全幅浸水诱发地表全部发生沉降，另外隧道上方地表沉降值大于两侧沉降值，说明基底浸水条件下隧道的存在加剧了地表沉降，基底浸水深度越大，地表沉降越明显。

### 3.4 湿陷性黄土围岩浸水对地铁隧道影响机制分析

湿陷黄土层浸水对地铁隧道具有不利影响。



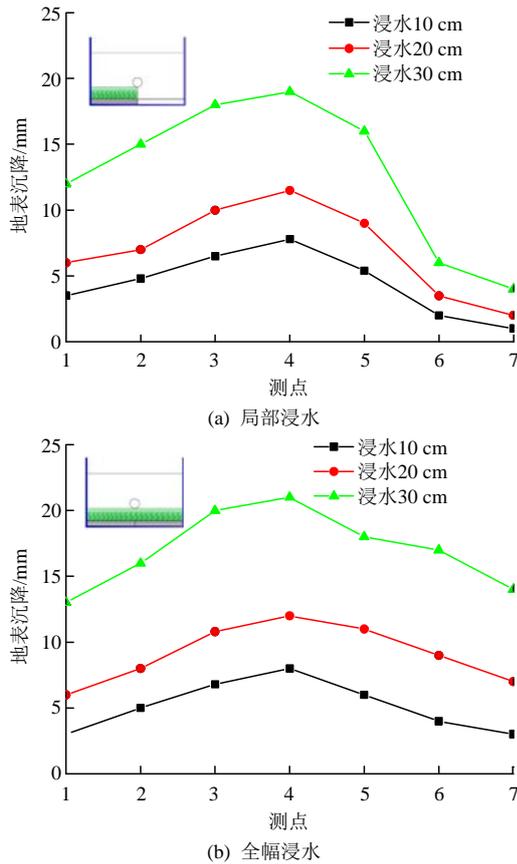


图 10 基底浸水地表沉降  
Fig.10 Ground settlement of foundation immersion

王二磊等<sup>[5]</sup>采用数值方法，分析了自上而下和自下而上 2 种浸水方式对地铁隧道的影响规律；邵生俊等<sup>[17-18]</sup>首先对湿陷性黄土隧道环境等级进行划分，进而建立了湿陷场地和隧道地基的湿陷变形计算方法，模拟了隧道地基湿陷沉降差作用下衬砌结构响应。随着黄土地区地铁工程的大量建设，研究人员逐渐认识到黄土湿陷性对地铁隧道影响研究的必要性，但目前湿陷性黄土地层浸水对地铁隧道的影响机制尚不明确，本文将根据试验结果做初步探讨。

对于深埋地铁隧道而言，虽然地表水影响较小，但地下水位改变导致的基底浸水对隧道结构影响明显，图 11 给出了湿陷性黄土地铁隧道基底浸水对结构的影响机制示意图。基底局部浸水导致地基局部湿陷变形、承载力降低，隧道可能发生不均匀竖向位移和水平位移，诱发隧道上方围岩的拱效应减弱，松散塑性区增大，作用于隧道结构的松散围岩压力增大。由于地基差异沉降引起隧道竖向位移和水平位移，还会对隧道造成附加扭矩作用，同时引起地表局部不均匀沉降。基底全幅浸水诱发地基均匀湿陷变形，地基承载力整体降低，地基与隧道可能发生脱空，隧道发生整体竖向位移，水平位移不明显，

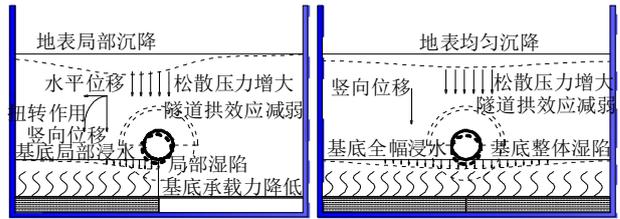


图 11 基底浸水影响机制  
Fig.11 Influence of foundation immersion

隧道下沉导致隧道上方压力拱效应减弱，塑性区增大，松散压力增加，最终诱发地表整体沉降，由于隧道的存在，其上方地表沉降更明显。

某些地铁区间埋深较浅，对于浅埋地铁隧道，地表裂隙渗水可能对隧道结构造成明显影响。图 12 给出了地表浸水对地铁隧道结构影响的机制。地表局部浸水造成黄土地层结构性丧失，随着浸水深度的增加，隧道上方围岩拱效应逐渐局部丧失，自承能力降低，土体荷载部分作用于隧道结构，通过荷载传递作用进一步作用于隧道地基，引发隧道整体水平位移和竖向位移，同时，由于隧道局部受力不均可能对隧道造成附加扭转作用。地表全幅均匀浸水使得隧道上方整体土层浸水湿陷，随着浸水深度增加，地层结构性完全丧失，上方围岩拱效应完全消失，围岩不存在自承能力，隧道上方土层荷载完全作用于隧道结构，隧道周边土压力增大，造成隧道整体明显的竖向位移，同时对隧道地基造成附加荷载。



图 12 地表浸水影响机制  
Fig.12 Influence of ground surface immersion

结合测试结果，基底局部浸水和地表局部浸水会造成隧道整体水平和竖向位移明显，隧周土压力和弯矩变化不均匀，同时由于局部附加荷载作用会对隧道造成附加扭转作用。基底全幅浸水和地表全幅浸水引起隧道明显的竖向位移，水平位移不明显，虽然竖向位移值大于局部浸水，但附加荷载均匀增加不会对隧道造成附加扭转作用，衬砌土压力和弯矩变化也相对均匀，因此局部不均匀浸水导致的不均匀湿陷变形对隧道的影响更不利。

### 3.5 基底剩余湿陷量控制标准

当地铁隧道基底湿陷性土层厚度较大时, 如果按照《湿陷性黄土地区建筑规范》建议的完全处理湿陷土层, 可能造成经济上较大的浪费, 而且现有隧道基底地基处理技术也无法达到很深的处理深度, 随着基底处理深度的增加, 其费用支出会翻倍的增长。因此, 本节主要讨论对于一定厚度湿陷性土层的基底地基, 是否需要全部处理? 是否允许有一定厚度的湿陷性土层存在? 结合本文试验成果, 给出一定湿陷厚度基底地基处治深度的合理建议值。

基于地铁隧道湿陷性黄土地基局部不均浸水试验结果可以看出, 当浸水深度较小( $<10\text{ cm}$ )时, 隧道衬砌弯矩值和轴力值变化不是很大, 土压力变化值也基本在  $5\text{ kPa}$  之内, 隧道水平位移和竖向位移分别仅为  $2.5$  和  $4.4\text{ mm}$ , 地表沉降值也普遍较小。说明当湿陷土层为  $30\text{ cm}$ , 仅仅湿陷  $10\text{ cm}$  对隧道整体影响不大, 但随着浸水深度的增加, 隧道弯矩、轴力、土压力、隧道位移和地表沉降值均明显增加; 当浸水深度达到  $20\text{ cm}$ , 隧道受力和位移变化均比较明显, 因此对于基底局部不均浸水工况而言, 可允许有  $10\text{ cm}$  的剩余湿陷量。由全幅均匀浸水试验结果可以看出, 当浸水深度较小( $<10\text{ cm}$ )时, 隧道衬砌弯矩值和轴力值变化更小, 相比局部不均浸水而言, 全幅均匀浸水对隧道结构整体受力反而更有利, 土压力变化值稍大, 但也基本在  $8\text{ kPa}$  之内。当基底浸水  $10\text{ cm}$  时, 隧道水平位移不明显, 竖向位移达到  $6.0\text{ mm}$ , 地表沉降值相比局部不均浸水工况整体有所增加, 但整体上也不超过  $7\text{ mm}$ , 说明当湿陷土层为  $30\text{ cm}$ , 仅仅湿陷  $10\text{ cm}$  对隧道整体影响也不大, 因此对于基底全幅均匀浸水工况而言, 也允许有  $10\text{ cm}$  的剩余湿陷量。因此, 结合试验结果, 如果隧道基底湿陷性土层为  $30\text{ cm}$  时, 建议湿陷性地基的处治深度为  $20\text{ cm}$  即可, 可允许有  $33.3\%$  的剩余湿陷量。

## 4 结论与建议

(1) 研制了满足地表和基底不同浸水工况的试验模型箱, 尺寸为  $1.8\text{ m}$ (横向长) $\times 0.6\text{ m}$ (纵向宽) $\times 1.6\text{ m}$ (竖向高), 通过设置上部浸水管和下部浸水箱, 实现了深埋隧道基底浸水和浅埋隧道地表浸水的模拟, 采用室内模型试验系统研究了大厚度湿陷性黄土地层浸水对地铁隧道的影响机制。

(2) 随浸水深度增加, 隧道基底局部浸水引起土压力重分布, 受土层的荷载传递机制, 土压力变

化趋势有所改变, 测点 3 增大, 测点 5 减小。地表局部浸水引起隧道周边土压力变化不均, 测点 2 变化不大, 测点 5 变化明显, 造成隧道附加弯矩作用。基底全幅浸水土压力随着浸水深度的增加逐渐减小, 地表全幅均匀浸水土压力逐渐增大, 两者变化趋势相对均匀。

(3) 基底局部浸水导致隧道地基局部承载力降低, 引起隧道衬砌弯矩发生不规律变化, 测点 1 和测点 7 最明显。基底全幅均匀浸水导致隧道地基承载力均匀降低, 衬砌各点的弯矩变化相对均匀。地表局部浸水结构强度完全丧失, 荷载完全作用于隧道衬砌上引起衬砌弯矩快速增大, 测点 4 和 8 最明显, 地表全幅均匀浸水时, 随着浸水深度的增加, 衬砌弯矩绝对值均匀变大。

(4) 基底局部浸水和地表局部浸水隧道发生了明显的水平位移和竖向位移。基底全幅浸水和地表全幅浸水隧道主要以竖向位移为主, 最大竖向位移分别达到  $22.2$  和  $9.4\text{ mm}$ , 水平位移不明显。基底浸水引起的隧道位移比地表浸水更大, 局部不均匀浸水导致的差异沉降会隧道作用附加扭转作用, 对隧道整体更不利。

(5) 结合本文试验成果给出一定湿陷厚度基底地基处治深度的合理建议值, 当基底湿陷性土层为  $30\text{ cm}$ , 仅仅湿陷  $10\text{ cm}$  对隧道整体影响不大, 对于基底浸水工况而言, 湿陷性地基的处治深度为  $20\text{ cm}$  即可, 允许有  $33.3\%$  的剩余湿陷量。

### 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 Zhengong, et al. Influence of discontinuous distribution of collapsible loess on its deformation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(1): 165 - 170.(in Chinese))
- [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 - 1 006.(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 - 1 006.(in Chinese))
- [3] 黄训洪. 黄土隧道地基纵向局部湿陷对结构的力学行为影响研究[硕士学位论文][D]. 成都: 西南交通大学, 2017.(HUANG Xunhong. Study on the tunnel lining mechanical behavior induced by longitudinal local collapsibility of loess tunnel foundation[M. S. Thesis][D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.(in Chinese))
- [4] 刘俊平. 地下水对董志塬黄土隧道工程性质的影响分析[J]. 铁道标准设计, DOI: org/10. 13238/j. issn. 1 004 - 2 954. 201803160001. (LIU Junping. Analysis of the influence of groundwater on engineering property of loess tunnel in Dongzhiyuan regions[J]. Railway Standard

- Design, DOI: org/10.13238/j.issn.1004-2954.201803160001.(in Chinese)
- [5] 王二磊, 梁庆国, 王飞, 等. 不同浸水方式对黄土地铁隧道变形影响研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(1): 156-162.(WANG Erlei, LIANG Qingguo, WANG Fei, et al. Study on the influence of different flooding methods on the deformation of loess metro tunnel[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(1): 156-162.(in Chinese))
- [6] 黄雪峰, 陈正汉, 方祥位, 等. 大厚度自重湿陷性黄土地基处理厚度与处理方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增2): 4332-4338.(HUANG Xuefeng, CHEN Zhenghan, FANG Xiangwei, et al. Study on foundation treatment thickness and treatment method for collapsible loess with large thickness[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Supp.2): 4332-4338.(in Chinese))
- [7] 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.(in Chinese))
- [8] 杨校辉, 黄雪峰, 朱彦鹏, 等. 大厚度自重湿陷性黄土地基处理深度和湿陷性评价试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(5): 1063-1074.(YANG Xiaohui, HUANG Xuefeng, ZHU Yanpeng, et al. Experimental study on collapsibility evaluation and treatment depths of collapsible loess upon self weight with thick depth[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(5): 1063-1074.(in Chinese))
- [9] 苏立海, 姚志华, 黄雪峰, 等. 自重湿陷性黄土场地的水分运移规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增2): 4328-4336.(SU Lihai, YAO Zhihua, HUANG Xuefeng, et al. Water migration regularity of self weight collapsible loess ground[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(Supp.2): 4328-4336.(in Chinese))
- [10] 王小军, 米维军, 熊治文, 等. 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, 2012, 34(1): 83-90.(WANG Xiaojun, MI Weijun, XIONG Zhiwen, et al. Water immersion field tests of collapsibility of loess foundation of Zhengzhou—Xi'an passenger dedicated line[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(1): 83-90.(in Chinese))
- [11] 马闫, 王家鼎, 彭淑君, 等. 大厚度黄土自重湿陷性场地浸水湿陷变形特征研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(3): 537-546.(MA Yan, WANG Jiading, PENG Shujun, et al. Immersion tests on characteristics of deformation of self-weight collapsible loess under overburden pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(3): 537-546.(in Chinese))
- [12] 王铁行, 金鑫, 罗扬. 考虑卸荷作用的黄土湿陷性评价方法研究[J]. 岩土力学, DOI: org/10.16285/j.rsm.2017.2198.(WANG Tiehang, JIN Xin, LUO Yang. Evaluation method for loess collapse potential of unloading[J]. Rock and Soil Mechanics, DOI: org/10.16285/j.rsm.2017.2198.(in Chinese))
- [13] 张爱军, 邢义川, 胡新丽, 等. 伊犁黄土强烈自重湿陷性的影响因素分析[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(增2): 117-122.(ZHANG Aijun, XING Yichuan, HU Xinli, et al. Influence factors of strong self-weight collapsibility of Ili loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(Supp.2): 117-122.(in Chinese))
- [14] 张爱军, 邢义川, 汪海涛, 等. 基于增湿变形的渠道工程黄土渠基湿陷性评价方法[J]. 水利学报, 2017, 48(1): 41-51.(ZHANG Aijun, XING Yichuan, WANG Haitao, et al. Evaluation method for collapsibility of channel engineering with Loess foundation based on moistening deformation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(1): 41-51.(in Chinese))
- [15] 李喜安, 洪勃, 李林翠, 等. 黄土湿陷对渗透系数影响的试验研究[J]. 中国公路学报, 2017, 30(6): 198-208.(LI Xi'an, HONG Bo, LI Lincui, et al. Experimental research on permeability coefficient under influence of loess collapsibility[J]. Chinese Journal of Highway, 2017, 30(6): 198-208.(in Chinese))
- [16] 张耀, 胡再强, 陈昊, 等. 酸性溶液对黄土结构改良的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(4): 681-688.(ZHANG Yao, HU Zaiqiang, CHEN Hao, et al. Experimental study on evolution of loess structure using acid solutions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(4): 681-688.(in Chinese))
- [17] 邵生俊, 杨春鸣, 焦阳阳, 等. 湿陷性黄土隧道的工程性质分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(9): 1580-1590.(SHAO Shengjun, YANG Chunming, JIAO Yangyang, et al. Engineering properties of collapsible loess tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(9): 1580-1590.(in Chinese))
- [18] 邵生俊, 陈菲, 邵帅. 黄土隧道地基湿陷变形评价方法探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(5): 1289-1300.(SHAO Shengjun, CHEN Fei, SHAO Shuai. Collapse deformation evaluation method of loess tunnel foundation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(5): 1289-1300.(in Chinese))
- [19] 翁效林, 王俊, 王立新, 等. 黄土地层浸水湿陷对地铁隧道结构影响试验研究[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.(in Chinese))
- [20] 张玉伟, 翁木生. 大厚度湿陷性黄土地层浸水条件下承载桩基对邻近隧道的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(8): 2040-2050.(ZHANG Yuwei, WENG Musheng. Influence of pile foundation to adjacent tunnel with water immersion in collapsible loess layer of great thickness[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(8): 2040-2050.(in Chinese))
- [21] 郑甲佳, 赵可. 围岩浸水对黄土地铁隧道稳定性影响分析[J]. 铁道学报, 2011, 33(2): 91-95.(ZHENG Jiajia, ZHAO Ke. Influence on stability of loess subway tunnel in flooded surrounding rock[J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(2): 91-95.(in Chinese))
- [22] 谢永利, 翁效林, 张玉伟, 等. 一种多浸水工况模拟试验模型箱及试验方法[P]. 中国: 201710057182.X. 2017-04-26.(XIE Yongli, WENG Xiaolin, ZHANG Yuwei, et al. A model test box for multi flooded condition simulation test and test method[P]. China: 201710057182.X. 2017-04-26.(in Chinese))
- [23] 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[博士学位论文][D]. 西安: 长安大学, 2017.(ZHANG Yuwei. Study on mechanical characteristics of metro tunnel based on soaking of loess layer[Ph. D. Thesis][D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.(in Chinese))
- [24] 张延杰, 王旭, 梁庆国, 等. 湿陷性黄土模型试验相似材料的研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增2): 4019-4024.(ZHANG Yanjie, WANG Xu, LIANG Qingguo, et al. Development of model test similar material of collapsible loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(Supp.2): 4019-4024.(in Chinese))