

DOI: 10.11779/CJGE201608003

黄土地层浸水湿陷对地铁隧道影响试验研究

翁效林¹, 王俊^{1, 2}, 王立新^{1, 2}, 张玉伟¹

(1. 长安大学特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安 710067)

摘要: 黄土地层浸水湿陷对地铁隧道结构的影响是较为突出的岩土工程问题之一, 为深入研究黄土层湿陷变形对隧道衬砌结构的影响机制, 通过改进长安大学离心机浸水装置和监测设备, 系统开展了浸水条件下湿陷性黄土层对地铁隧道结构影响的离心模型试验, 试验结果表明: 地铁隧道周边黄土浸水湿陷会导致土层重度增加, 隧道拱顶土层内部拱效应因湿陷而消散, 土层自重压力增加且完全由隧道结构承担, 从而会导致隧道结构受力和变形不利, 传统的深埋隧道结构设计理论需考虑湿陷条件下拱顶土压力的不利增长因素; 地铁隧道基底下黄土地基的浸水湿陷会明显诱发隧道结构的附加作用应力, 但一定厚度的非湿陷性黄土或有效处理过湿陷性黄土层抵御下伏土体湿陷变形的能力不容忽略, 非湿陷土层厚度越大, 对于抵御湿陷变形的能力越强; 隧道基底土层不均匀浸水湿陷会导致隧道拱顶部呈现受拉状态, 底部呈现受压状态, 隧道拱顶所承受的附加应力更大, 约为拱底附加压应力的3倍, 隧道基底的自重湿陷变形对隧道顶部衬砌结构所造成的破坏更严重。

关键词: 隧道工程; 自重湿陷性黄土; 离心模型试验; 浸水湿陷; 隧道结构

中图分类号: TU444 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)08-1374-07

作者简介: 翁效林(1980-), 男, 河南信阳人, 副教授, 从事特殊土性状及地下工程研究。E-mail: 49768532@qq.com.

Experimental research on influence of loess collapsibility on subway tunnels

WENG Xiao-lin¹, WANG Jun^{1, 2}, WANG Li-xin^{1, 2}, ZHANG Yu-wei¹

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Changan University, Xi'an 710064, China; 2. China

Railway First Survey and Design Institute Group Ltd, Xi'an 710067, China)

Abstract: The influence of immersion collapse of the large-thickness loess layer on the subway tunnel structure is one of the prominent problems in geotechnical engineering problems. To study the problem in depth, centrifugal model tests are carried out by considering two factors (collapsible loess layer around the tunnel and collapsible loess layers with different thicknesses of tunnel bottom) with the improved centrifugal field immersion devices and test monitoring equipments. The test results show that the immersion collapse causes effective severe increase of the collapsible loess layer around the tunnel, and the arching effect of soil inside the tunnel vault disappears due to collapse. The weight of earth pressure on the tunnel structure increases significantly, which has bad influence on force and deformation of tunnel structure. The traditional design theory of deep-buried tunnel should consider these negative factors. The capacity of non-collapsible loess with a certain thickness and collapsible loess layer which are treated effectively against the deformation caused by the collapsible soil layer below tunnel should not be ignored. The greater the thickness of the foundation treatment, the stronger the ability to resist the deformation caused by the collapse. The thickness of the rest collapsible layer of tunnel structure base should be considered in the design of collapsible loess composite foundation.

Key words: tunnel engineering; self-weight collapse loess; centrifuge test; immersion; tunnel structure

0 引言

由于湿陷性黄土特殊的疏松土质结构, 受扰动、浸水或增湿作用反应敏感^[1], 当隧道穿越大厚度湿陷性黄土地层, 会因地层湿陷导致结构体产生附加作用而产生破坏, 因此, 国内外众多学者对大厚度黄土地层湿陷特性及其对结构物稳定性的影响展开了一系列的研究。文献[2~4]通过大厚度湿陷性黄土地层现场

浸水试验, 研究了大厚度自重湿陷性黄土地基处理深度与剩余湿陷量的合理控制关键技术难题。王小军等^[5]通过对郑西客运专线沿线黄土湿陷性开展研究, 并在地基处理深度优化、桩基负摩擦力设计深度及路基防排水宽度优化等方面提出地基处理措施建

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278063)

收稿日期: 2015-07-30

议。景韧等^[6]通过某穿越湿陷性黄土地层隧道某塌方段地层—结构法和荷载—结构法的数值对比计算分析认为虽然隧道上方塌陷区黄土围岩的承载潜力要考虑到计算中, 单纯的荷载结构法计算不能充分反映衬砌支护结构受力、变形的实质。邵生俊等^[7]结合湿陷性黄土隧道的工程特点, 针对隧道施工过程中围岩稳定性和湿陷变形对衬砌结构影响的两个重要问题, 提出了隧道地基湿陷性变形的评价方法和围岩压力的确定方法。可以看出, 已有的研究多基于湿陷黄土区域特定工程及特定工法开展针对性研究, 这些成果为后续的深入研究奠定了一定基础, 但结合地铁隧道系统分析黄土的湿陷产生机制、隧道结构适应变形能力以及隧道土体相互作用机理等方面的研究工作并不多见。另外, 由于地下结构无论是湿陷性产生条件还是湿陷性评价机制等方面均与地面结构差异甚远, 现行的《湿陷性黄土地区建筑规范》(GB 50025—2004)有关规定的适宜性值得怀疑。目前, 中国首次编制实施的《铁路黄土隧道技术规范》(Q/CR 9511—2014)对有关隧道基底湿陷性黄土层处理措施作了一定的规定和说明, 但该规范处于初期使用阶段, 尚需进一步的实践总结与检验修正。因此深入研究地铁工程中黄土的湿陷产生机制及自重湿陷变形对隧道衬砌结果的附加作用应力, 从而有效解决大厚度黄土地层地铁建设工程中遇到的湿陷性问题就显得很有必要。考虑到黄土地层湿陷对地铁隧道影响机制的空间与时间分布特征可以在土工离心模型试验中有效实现, 本文借助土工离心机试验手段, 结合实际工程案例, 来进一步阐明黄土地基湿陷对地铁结构长期影响机制, 研究成果可以为类似工程的设计与施工提供借鉴。

1 离心模型试验过程

所有试验用土均取自西安地铁临潼线洪庆站附近, 基本地貌为塬前洪积台地, 自重湿陷性黄土场地浅基础地基的湿陷等级为IV级, 取样所在土层为老黄土, 平均自重湿陷系数为0.045^[8]。试验模型中湿陷性

黄土层采用原状湿陷性黄土(从原位采集整块试验土块, 保持其天然含水率和结构性装箱运输至实验室, 再按照试验的尺寸加工而成模型土块, 如图1所示), 土体基本参数: 天然重度为15.1 kN/m³, 含水率为16.7%, 孔隙比为1.16, 压缩模量为12.6MPa。模型箱中在湿陷性黄土层下布设50 mm厚度细砂层。

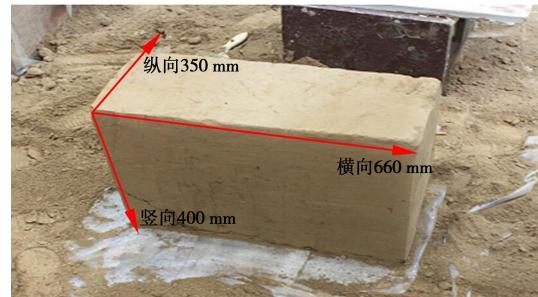


图1 隧道结构周边原状黄土模型

Fig. 1 Loess around tunnel model

试验分别考虑隧道周边和基底两种工况下黄土层湿陷过程对地铁隧道的影响, 共制作12组试验模型, 具体工况如表1所示。其中周边湿陷工况保持隧道拱顶埋深 $H = 2.5 D_t$ (隧道直径), 隧道拱顶埋深25 cm, 且整个模型土层全部为原状湿陷性黄土; 基底湿陷工况隧道结构拱顶埋深 H 为 $1.5 D_t$, 仰拱底板以上土层厚度为 $2.5 D_t$, 底板下土层厚度为15 cm, 考虑3种基底剩余湿陷土层厚度, 分别为15 cm、剩余10 cm(非湿陷土层5 cm)和剩余5 cm(非湿陷土层10 cm), 横向布置基底剩余湿陷土层厚度为5~10 cm。

本次试验模型箱尺寸为700 mm(横向长)×360 mm(纵向宽)×500 mm(竖向高), 隧道周边黄土层湿陷工况隧道模型纵向布置(图2(a)), 分别考虑土层半幅非均匀湿陷和全幅均匀湿陷等极端浸湿情况对隧道结构弯矩和径向压力的影响^[9]。对隧道模型半幅浸水和全幅浸水时, 分别在隧道模型中部位置布置监测断面A, 在模型外侧周围均匀设置8个土压力测点(编号为E1~E8), 采用通用的微型土压力计进行量测。

表1 测试工况

Table 1 Test cases

隧道湿陷位置	湿陷情况	模型布置	湿陷性土层厚度	隧道拱顶填方厚度/cm	测试项目
周边土层湿陷工况	半幅非均匀、全幅均匀湿陷	纵向	全部土层 40 cm	25	断面A 径向压力变化(E1~E8)
	半幅非均匀湿陷	纵向	基底土层 15 cm, 剩余土层 10, 5 cm	15	断面B 弯矩变化(S1~S8)
		横向	剩余基底土层 5~10 cm	15	隧道附加应变(FBG1~FBG13)
全幅均匀湿陷	纵向	基底土层 15 cm, 剩余基底土层 10, 5 cm	15	断面C 径向压力变化(S9~S16)	

隧道基底黄土浸水湿陷工况隧道模型分别纵、横向布置。纵向布置时(图2(b)),半幅浸水时在隧道模型中部位置布置监测断面B,分别布设8个弯矩测点(编号为S1~S8),全幅浸水时在隧道模型中部位置布置监测断面C,分别布设8个弯矩测点(编号为S9~S16)。另外,试验过程中为有效获取因浸水湿陷而导致的隧道周边土体位移场分布尤为重要,受制于离心模型监测手段,隧道模型纵向布置时(模型长度为350 mm),在浸水影响区范围内纵横方向画设纵

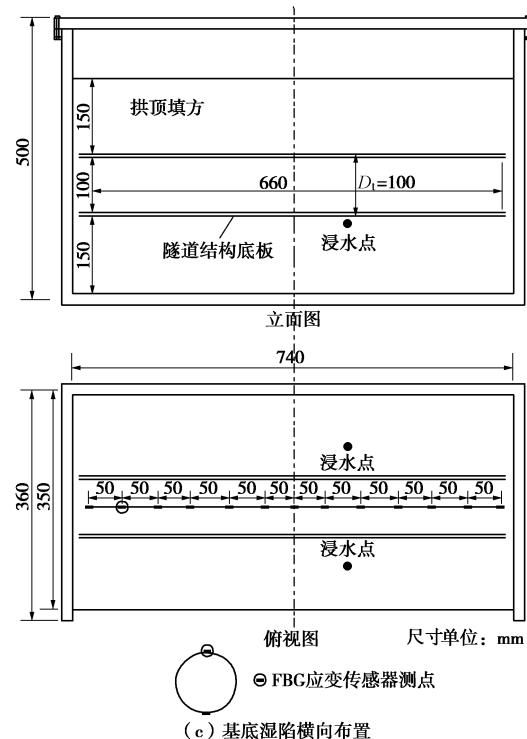
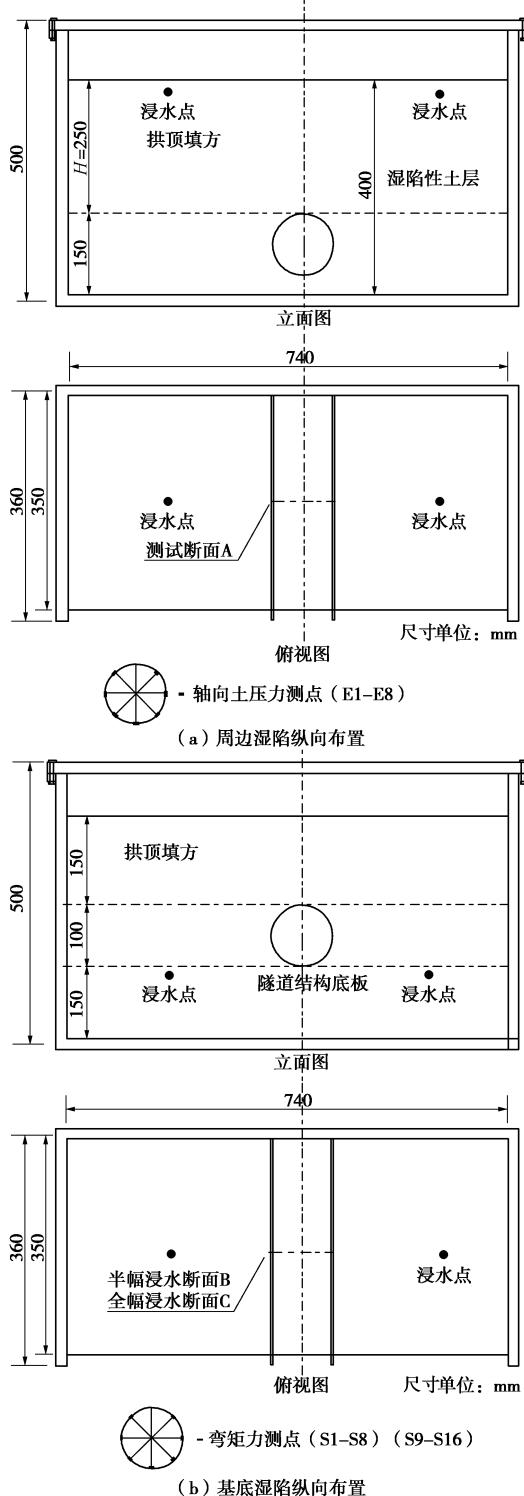


图2 不同湿陷位置隧道模型布置图

Fig. 2 Layout of tunnel model

横经纬线,并以纵横线交汇处为基准点,纵横间距为20 mm×20 mm,利用土工离心机高速摄像设备获取不同时段各基准点变形后纵横坐标值,通过坐标变化来绘制各测点横向和纵向位移变化值。

隧道结构刚度效应所对试验结果的影响不容忽视,依据廖少明等^[10]研究结论,横向布置隧道模型长度为660 mm,如图2(c)所示,分别在隧道模型的拱顶表层和拱底表层位置处粘贴两光纤光栅应变(FBG)传感系,每根传感系分别布置13个FBG应变传感器,在隧道基底黄土浸水湿陷过程中实时监控因地层不均匀湿陷而导致的隧道结构应变变化。

试验重点研究地铁隧道周边和基底黄土浸水湿陷对隧道结构受力与变形的影响,不考虑隧道结构体施工过程对周边黄土初始状态的影响,故隧道模型由有机玻璃管一次加工成形,其弹性模量为6 GPa,泊松比为0.3,模型管直径拟为100 mm,壁厚10 mm(如图3所示)。Taylor^[11]指出,根据抗弯刚度等效原则,横向受弯条件下,离心模型与原型隧道管片厚度的弯矩比尺关系为 $E_m I_m = n^3 E_p I_p$,式中,n为离心加速度与重力加速度的比值, E_m , I_m 分别表示离心模型隧道管片的弹性模量与横截面惯性矩, E_p , I_p 分别表示原型隧道管片的弹性模量与横截面惯性矩。横截面惯性矩可由下式求得:

$$I = t^3 / 12 \quad , \quad (1)$$

式中,t为隧道管片厚度。模型试验相似比例n=60,

根据模型试验相似理论^[11], 制定相似法则如表2所示, 故有机玻璃材质隧道模型相当于原型中厚度为350 mm的混凝土管片盾构隧道(弹性模量为30 GPa)。离心机运行前, 隧周湿陷工况模型可通过在原状土层中凿孔暗挖通道, 将隧道模型推进放入来实现, 隧道模型与原状黄土层之间的缝隙通过细砂吹填密实; 基底黄土湿陷工况, 可将隧道模型放置于图2相应位置, 再通过填埋来完成。

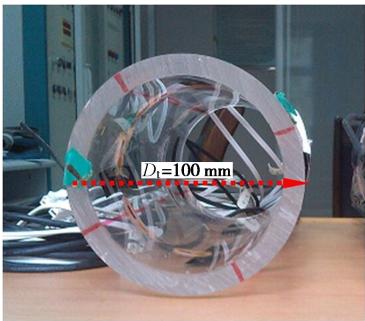


图3 纵向布置隧道结构模型

Fig. 3 Longitudinal layout of tunnel structure model

表2 离心试验相似法则

Table 2 Similarity laws of centrifuge tests

参数	单位	相似比(模型/原型)
重力加速度	m/s^2	n
长度	m	$1/n$
体积	m^3	$1/n^3$
重力	$\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$	$1/n^2$
密度	kg/m^3	1
重度	N/m^3	n
应力	N/m^2	1
应变	—	1
时间	m	$1/n^2$

试验基于长安大学土工离心机研发安装了离心场浸水装置。该装置包括输水系统和分散系统两个子系统。输水系统由储水箱、输水管、电磁阀、独立开关等组成, 储水箱由不锈钢板焊接而成, 固定在离心机转臂上, 分散系统由有机玻璃密封制成, 其设计如图4。为了能够实现均匀浸水, 将浸水装置分成了4个间隔, 每个间隔各有一根长度相同的输水管供水, 输水管连接储水箱与浸水分散装置, 由电磁阀控制, 浸水分散装置下部可以在不同位置安装直径1 cm的浸水探头, 探头的长度可以根据实验工况调整。由于原状黄土层的饱和度达到85%即达到了完全饱和湿陷状态, 因此外挂储水箱中储备水量根据模型土样计算得出, 可确保模型土体全部达到饱和湿陷状态。试验浸水前, 先将模型在离心机运行到60g状态, 然后通过电动开关控制浸水过程, 水分在离心力作用下在土体

内部逐步迁移, 最终达到黄土土层完全湿陷。

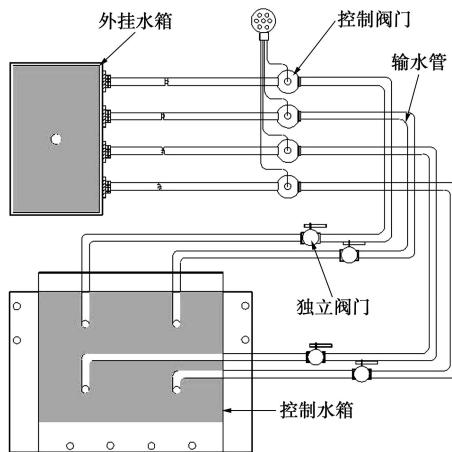


图4 浸水装置设计图

Fig. 4 Design and installation of water immersion device

2 试验结果

2.1 隧道围岩黄土湿陷对隧道结构的影响

图5为隧道结构周边黄土浸水湿陷条件下, 由监测断面A测试得出的隧道模不同位置径向压力归一化值($\sigma/\gamma H$)变化时程曲线, 从图5可以看出, 全幅浸湿状态下隧道结构径向压力皆大于半幅浸湿状态, 且随着隧道周边土体湿陷过程的逐渐完成, 径向压力值在逐渐加。全幅浸水状态下, 拱顶土压力归一化值 $\sigma/\gamma H$ 从0.57逐渐增加至1左右, 表明此时拱顶填土的重度已经完转换为隧道结构的径向压力。Shibayama等^[12]认为, 深埋隧道结构所受的径向压力可以运用如下公式计算:

$$\sigma_r = [(1+K)/2 + (1-K)/2 \cos 2\theta] \sigma_v, \quad (2)$$

式中, σ_r 为隧道结构计算点径向压力计算值, σ_v 为隧道结构计算点的土体垂直向自重应力, θ 为计算点水平方向倾角, K 为侧向土压力系数。

基于试验模型, 分别计算隧道覆盖土层松弛状态下($K=0.34$)和紧密状态下($K=1$)的隧道不同位置径向土压力计算值, 如图5中灰色阴影部分, 可以看出, 随着隧道周边湿陷性黄土层浸水湿陷过程的逐渐完成, 不同位置的径向压力皆大于公式计算值。图5试验规律可以从两个方面来解释, 一方面土体浸湿后, 其土体因重度增加而导致土压力增加, 另一方面隧道周边黄土浸水湿陷过程后, 深埋隧道拱顶土层内部拱效应因黄土浸水过程而完全消失, 从而导致隧道上方的自重土压力完全由隧道结构自身承担, 且这种土体内部拱效应的消散随着浸水程度的增加越发明显, 双幅均与浸水条件下拱顶(E_1 测点)的土压力值在土体湿陷产生一段时间后, $\sigma_{\text{测}}$ 值明显大于上部土体自重 γH 。

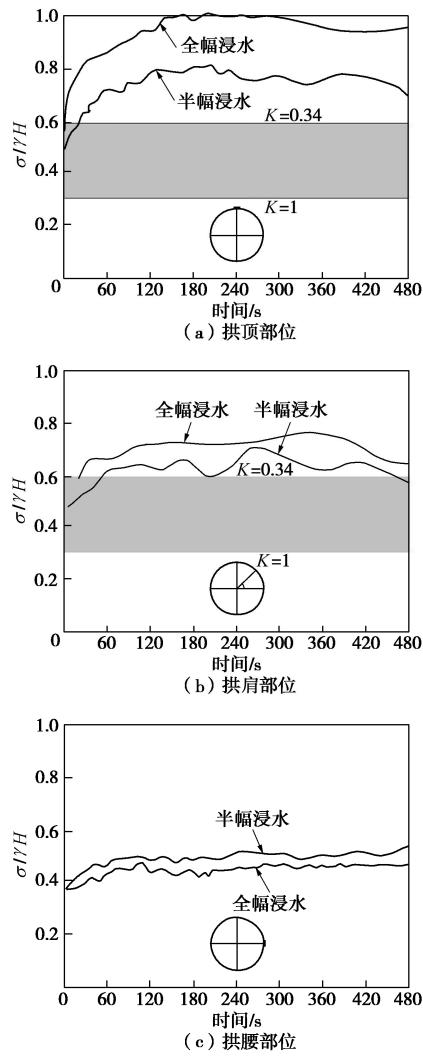


图 5 浸水条件下拱顶土压力变化时程曲线

Fig. 5 Soil pressure under water immersion

2.2 隧道黄土地基的剩余湿陷量

图 6 为不同浸湿条件下, 浸水前后纵向布置地铁隧道结构不同位置弯矩变化图。相对于全幅浸水, 半幅浸水隧道弯矩变化更为明显, 这是因为基底湿陷黄土地基在不均匀浸水条件下更容易造成地基表面的不均匀沉陷, 将对隧道结构产生更为明显的变形和附加应变。由图 6 (a) 可见, 基底湿陷黄土层厚度为 15 cm 时, 隧道的上拱肩和拱腰处变化较为明显, 弯矩增幅最大值甚至达到 $98 \text{ kN} \cdot \text{m/m}$, 随着基底剩余湿陷土层厚度减小, 这种附加弯矩的增加幅度和范围都在变小, 当剩余湿陷土层厚度为 5 cm 时, 浸水前后隧道结构的变化幅度已不明显。比较图 6 (a) 和图 6 (b) 可以看出, 全幅均匀湿陷比半幅不均匀湿陷对隧道结构的影响相对较小, 但即使在全幅湿陷条件下, 仍会由于不同地基部位的水分迁移量不同而导致了黄土湿陷的不均匀性, 如图 6 (b) 中 15 cm 厚黄土地基在全幅浸水条件下仍在隧道结构的左拱肩区域产生了过于明显的附加弯矩值 (最大值 $59 \text{ kN} \cdot \text{m/m}$)。

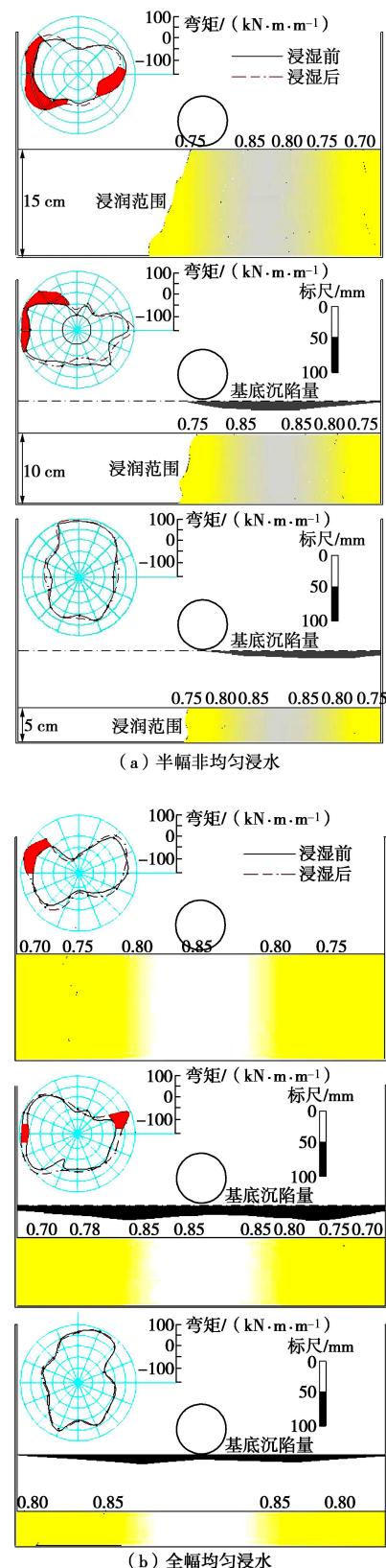


图 6 不同地基剩余湿陷土层隧道弯矩变化图

Fig. 6 Variation of bending moment of tunnel in different residual wet soil layers

比较不同地基剩余湿陷土层厚度下地表沉陷规律可以看出, 全幅均匀浸水条件下, 由于湿陷程度更

大而导致地基表层的沉陷更为明显, 在基底剩余土层为 10 cm 时, 隧道基底沉陷最大值 43 mm, 而半幅非均匀浸水最大值仅为 22 mm, 但是半幅非均匀浸水条件下隧道结构弯矩附加变化区域和极值都较大, 从而说明非均匀湿陷导致基底差异沉降是隧道结构体变形破坏的主要诱因之一。另外, 从图 6 还可以看出, 当基底剩余湿陷土层厚度为 5 cm 时, 基础表层的差异沉降很小, 隧道结构的附加弯矩变化已经很不明显。从而说明基底一定厚度的非湿陷性黄土或有效处理过的湿陷性黄土层抵御下伏存在的湿陷引起的变形的能力不容忽略, 地基处理厚度越大, 对于抵御湿陷引起的变形的能力越强, 当处理深度达 10 cm 以上时, 剩余湿陷土层对结构的影响已不明显, 继续加大处理深度会造成经济上的浪费。

图 7 为半幅非均匀浸水条件下, 横向布置地铁隧道基底下不同厚度剩余湿陷土层湿陷后隧道拱顶和底部附加应变变化趋势, 总体来看, 隧道基底土体不均匀浸水湿陷会导致隧道拱顶部呈现受拉状态, 底部呈现受压状态。相对于隧道拱底, 隧道拱顶所受到的附加应力更为可观, 拱顶附加拉应力约为拱底附加压应力 3 倍左右, 黄土的自重湿陷变形对隧道顶部衬砌结构所造成的破坏更为严重。从图 7 还可以看出, 隧道基底湿陷所引发的附加作用沿着隧道轴线不仅仅局限于浸水湿陷区域, 部分非浸水湿陷区域也会产生较为明显附加应力区域。另外, 隧道结构应变值随基底剩余湿陷土层厚度的减小而显著减小, 当剩余湿陷土层厚度 s 为 10 cm 时, 最大拉应变位于浸水点附近区域, 极大值达到 $3682 \mu\epsilon$, 拱底最大压应变极值达到

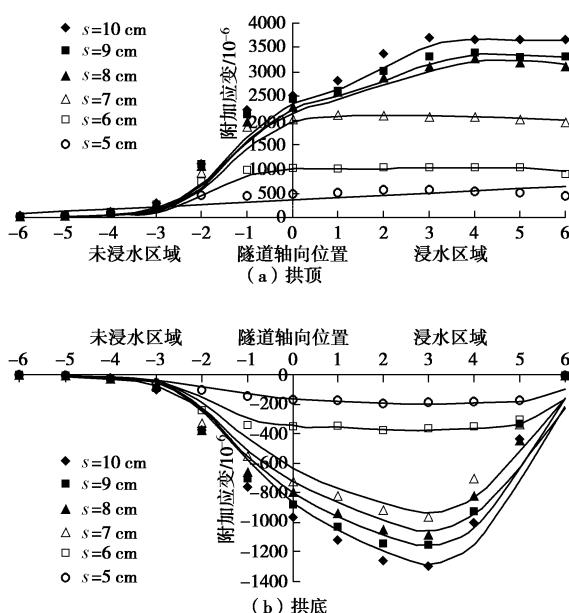


图 7 浸水湿陷条件下隧道附加应变变化

Fig. 7 Additional strains of tunnel

$1360 \mu\epsilon$ 。当 s 减小至 6 cm 时, 隧身拉应变值开始显著减小, 拱顶最大拉应变为 $1023 \mu\epsilon$, 拱底最大压应变 $388 \mu\epsilon$, 隧道基底黄土的自重湿陷变形对隧道衬砌的附加作用已不会再造成隧身结构的破坏。当 s 为 5 cm 时, 隧道基底非湿陷土层地基可以明显消散下部土层因自重湿陷而产生的不均匀沉陷, 对隧身结构的影响基本可以忽略。

3 结 论

(1) 地铁隧道围岩黄土浸水会导致土层重度增加, 隧道拱顶土层内部拱效应因湿陷而消散, 土层自重压力增加且完全由隧道结构承担, 从而会导致隧道结构受力和变形不利, 传统的深埋隧道结构设计理论需考虑湿陷条件下拱顶土压力的不利增大作用。

(2) 离心模型试验结果表明, 地铁隧道黄土地基的浸水湿陷会诱发隧道结构的附加作用。当模型隧道底板下湿陷黄土层厚度为 15 cm 时, 半幅不均匀湿陷导致隧道上拱肩和拱腰处所产生的附加弯矩最大值可达到 $98 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}$, 即使均匀浸水湿陷条件下也会在隧道结构的左拱肩区域产生过于明显的附加弯矩值。地铁隧道基底下一定厚度的非湿陷性黄土或湿陷性黄土层的有效处理对抵御下伏土体湿陷变形的能力不容忽略, 非湿陷土层厚度越大, 对于抵御湿陷变形的能力越强。

(3) 全幅均匀浸水条件下, 由于湿陷变形更大而导致地基表层的沉陷更为明显, 但是, 半幅非均匀浸水条件下隧道结构弯矩附加变化区域和极值都相对较大, 说明非均匀湿陷导致基底差异沉降是隧道结构体变形破坏的主要诱因之一。

(4) 隧道地基土层不均匀浸水湿陷会导致隧道拱顶部呈现受拉状态, 底部呈现受压状态。隧道拱顶所承受的附加应力更大, 约为拱底附加压应力 3 倍左右; 黄土的自重湿陷变形对隧道顶部衬砌结构所造成的破坏更为严重。

致 谢: 翁木生高工在本试验取样过程中, 马豪豪博士在本试验模型制作过程中都给予了帮助, 在此一并致谢。

参考文献:

- [1] 谢定义. 试论我国黄土力学研究中的若干新趋向[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 3 - 13. (XIE Ding-yi. Exploration of some new tendencies in research of loess soil mechanics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(1): 3 - 13. (in Chinese))
- [2] 黄雪峰, 杨校辉. 湿陷性黄土现场浸水试验研究进展[J]. 岩

- 土力学, 2013, **34**(增刊 2): 222 - 228. (HUANG Xue-feng, YANG Xiao-hui. A study progress on in-situ soaking test on collapsible loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(S2): 222 - 228. (in Chinese))
- [3] 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**(增刊 2): 4332 - 4338. (HUANG Xue-feng, CHEN Zheng-han, FANG Xiang-wei, et al. Study on foundation treatment thickness and treatment method for collapse loess with large thickness[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(S2): 4332 - 4338.)
- [4] 黄雪峰, 陈正汉, 哈 双, 等. 大厚度自重湿陷性黄土地基湿陷变形特征的大型现场浸水试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(3): 382 - 389. (HUANG Xue-feng, CHEN Zheng-han, HA Shuang, et al. Large area field immersion test on characteristics of deformation of dead weight collapse loess under overburden pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(3): 382 - 389. (in Chinese))
- [5] 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 Xiao-jun, MI Wei-jun, XIONG Zhi-wen, et al. Water immersion field of collapsibility of loess foundation of Zhengzhou-Xi'an passenger dedicated line[J]. Journal of China Railway Society, 2012, **34**(1): 83 - 90. (in Chinese))
- [6] 景 韧, 王永刚. 某湿陷性黄土隧道施工过程力学特性及塌陷区施工控制[J]. 公路, 2009(2): 205 - 210. (JING Ren, WANG Yong-gang. Mechanical behavior during construction process and construction control for collapsing stratum of collapsible loess tunnel[J]. Highway, 2009(2): 205 - 210. (in Chinese))
- [7] 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 Sheng-jun, YANG Chun-ming, JIAO Yang-yang, et al. Engineering properties of collapsible loess tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(9): 1580 - 1590. (in Chinese))
- [8] 罗俊忠, 张志强, 刘春龙, 等. 西安地铁临潼线、五号线穿越大厚度湿陷性黄土地基处理原则与措施研究[R]. 西安: 中铁第五勘察设计院集团有限公司, 西安理工大学, 2014. (LUO Jun-zhong, ZHANG Zhi-qiang, LIU Chun-long, et al. Study on the principles and measures for the treatment of Lintong metro line and line 5 of Xi'an metro cut through the large thickness collapsible loess foundation[R]. Xi'an: China Railway Fifth Survey and Design Institute Group Co, Ltd & Xi'an University of Technology, 2014. (in Chinese))
- [9] 郑建国, 高虎艳, 邓国华, 等. 西安地铁工程穿越湿陷性黄土地工程特性及应对措施研究[R]. 西安: 机械工业勘察设计研究院, 广州地铁设计研究院有限公司, 2013. (ZHENG Jian-guo, GAO Hu-yan, DENG Guo-hua, Research on engineering characteristics and countermeasures of Xi'an metro cut through collapsible loess foundation[R]. Xi'an: China Jikan Research Institute of Engineering Investigations and Design, Co, Ltd & Guangzhou Metro Design & Research Institute Co, Ltd, 2013. (in Chinese))
- [10] 廖少明, 侯学渊, 彭芳乐. 隧道纵向剪切传递效应及其一维解析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(7): 1110 - 1116. (LIAO Shao-ming, HOU Xue-yuan, PENG Fang-le. Longitudinal shear transfer of tunnel and its 1D analytical solution[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(7): 1110 - 1116. (in Chinese))
- [11] TAYLOR R N. Buried structures and underground excavations, geotechnical centrifuge technology[M]. London: Blackie Academic and Professional, 1995.
- [12] SHUHEI Shibayama, JUN Izawa, Akihiro Takahashi, et al. Observed behaviour of a tunnel in sand subjected to shear deformation in a centrifuge[J]. Soils and Foundations, 2010, **50**(2): 281 - 294.