

大厚度黄土地层拓宽路基浸水破坏机制

翁效林¹, 马豪豪², 王 俊³

(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. 中原工学院建筑工程学院, 河南 郑州 450015;
3. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安 710067)

摘要: 为研究大厚度湿陷性黄土地层浸水湿陷条件下拓宽路基变形破坏特性, 基于长安大学土工离心机, 安装了降雨浸水系统和位移量测系统, 开展与实际应力相一致的离心模型试验, 并根据试验结果探讨了湿陷性黄土地层拓宽路基的浸水破坏模式。试验结果表明: 拓宽路基荷载影响下, 新路基以及部分老路堤会产生新的沉降, 最大沉降值出现在拓宽路基形心处, 进而产生新旧路基间的不协调变形; 持续降雨将会在拓宽路基坡脚处产生雨水入渗, 入渗将诱发大厚度湿陷性黄土层内部产生非均匀湿陷, 这会导致新旧路基体产生不同程度的湿陷突变, 在湿陷突变所产生的差异沉降的作用下, 路基边坡首先出现裂缝, 进而在新旧路基拼接带处也出现裂缝, 最终面临因地基整体增湿失稳所带来的更为严重的路基路面塌陷、滑移等问题。

关键词: 大厚度湿陷性黄土; 拓宽路基; 浸水湿陷; 离心模型试验

中图分类号: TU44

文献标志码: A

Immersion Damage Mechanism of Widening Roadbed in Collapsible Loess with Great Thickness

WENG Xiaolin¹, MA Haohao², WANG Jun³

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of the Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China;
2. Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450015, China;
3. China Railway First Survey and Design Institute Group Ltd., Xi'an 710067, China)

Abstract: In order to study the wetting failure mode and mechanism of widening subgrade in self-collapsible loess areas, the rain system and deformation field test system were installed in geotechnical centrifuge of Chang'an University. The centrifugal modal test consistent with the actual stress was conducted using the undisturbed collapsible loess. The settlement law of widening roadbed flooded by rainfall was studied and the damage mode of widening roadbed was

analyzed according to the test results. The test results show that the foundation under widening roadbed produce a large settlement under the action of gravity load whose largest value appears in widening roadbed centroid place, resulting in a poor co-ordination deformation between new and old roadbed. The local instability of the foundation under widening roadbed caused by continuous rainfall poses a great threat to the safety of the upper widening roadbed. The formation of widening roadbed is a gradual process: First is the emergence of the collapsible caves. Next, appear the cracks in toe. Finally comes the large deformation caused by the wetting toes which gives rise to the damage of pavement even landslide.

Key words: self-weight collapse loess with great thickness; widening roadbed; immersion; centrifugal model test

在湿陷性黄土地区进行高速公路的改扩建工程不仅要面临拓宽路基常见的差异沉降问题, 还要面临因地层黄土湿陷性而带来的其他一系列问题。有关高速公路拓宽路基不协调变形及黄土路基稳定性方面的问题, 国内外学者展开了一系列的研究。黄琴龙等^[1]通过路基拓宽室内试验槽试验, 发现土工格栅加筋可以显著降低地基顶面所受的土压力, 从而减小新老路基不协调变形。刘金龙等^[2]利用非线性有限元的方法发现侧向位移在新老路基结合处最大, 因此必然会导致该处出现拉应力区, 进而产生裂缝。傅珍等^[3]应用有限元程序, 建立了差异沉降计算模型, 研究结果表明土基压缩模量越大, 路基高度越高, 差异沉降越小。Allersma 等^[4]利用离心机和 PLAXIS 程序分析了加宽路基的失稳破坏以及水平填筑和间隙法填筑对拓宽路基的不同影响。Han 等^[5]研究了桩网复合地基法在路基加宽工程中的应用, 并用有限元方法对其工程特性进行了分析。颜斌等^[6]运用离心模型试验研究了黄土路基的特性, 获

收稿日期: 2015-10-20

基金项目: 国家自然科学基金(51378004, 51008032)

第一作者: 翁效林(1980—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为特殊土性状及路基稳定性。E-mail: 49768532@qq.com

得了在不同路基深度及不同路堤高度下黄土路基因降雨引起的湿化沉降与水平变形分布情况.刘保健等^[7]依据黄土湿陷特性试验结果,提出了黄土湿陷量的计算方法和黄土增湿速率的确定方法,总结出可不考虑原状黄土地基湿陷变形的路堤填土高度.可以看出,这些研究工作取得了一系列的研究成果,为以后的研究工作奠定了基础.本文在以往研究成果基础之上,以拓宽路基坡角积水作为拓宽路基荷载下大厚度湿陷黄土地基湿陷破坏的主要诱因,基于长安大学土工离心机平台,通过离心场实现了原状土地基的构建和新老路基的填筑过程,研发离心场降雨增湿装置,整合基于位移传感器和应变计等传感器的电测系统,开展了大厚度黄土地层拓宽路基浸湿变形破坏离心试验研究.研究结果可为湿陷性黄土地区路基拓宽工程的设计与施工提供参考依据.

1 离心模型设计

1.1 试验模型设计

试验路基土样取自咸阳郊区,通过击实试验测得试验土料最佳含水量为 14.01%,最大干密度为 1.83 g·cm⁻³.利用四联直剪测得试验土料的黏聚力为 51 kPa,内摩擦角为 22°.地基土样采用原状湿陷性黄土(从原位采集整块试验土块,保持其天然含水量和结构性,装箱运输至实验室,再按照试验的尺寸加工而成模型土块),取样所在土层层底深度为 6.7~8.4 m,平均自重湿陷系数为 0.068,其基本物理指标见表 1.

表 1 试验土样物理指标

Tab.1 Physical indices of test samples

孔隙比	饱和度/ %	干密度/ (g·cm ⁻³)	天然含 水量/%	塑限/%	液限/%
1.186	1.85	1.39	12.84	18.8	31.6

在进行土工离心模型试验之前,须建立与试验研究相关的模型相似律.假设离心模型相似比为 1:N,模型箱中重力加速度将提高 N 倍(N·g),则

$$\frac{\sigma_{zm}}{\sigma_{zp}} = \frac{\rho_m(N \cdot g)z_m}{\rho_p g(N \cdot z_p)} = 1 \quad (1)$$

式中: σ_z 代表 z 点处土体应力(下标 m 代表模型,p 代表原型,以下相同); ρ 为土体密度.

由式(1)可见,离心模型试验中的模型土体应力场与原型土体的应力场是相同的.那么对于同种土而言,其变形特性和强度特性也是一致的,满足模型与原型之间几何形状、应力场、土体变形特性和土体

强度特性之间的相似关系.

另外,在土的固结及渗透过程模拟时,若模型和原型荷载条件及边界条件相同,两者的固结分析可采用时间分析法^[8].模型与原型在相同位置处的孔隙水压力相同,由于模型尺寸缩小至原型的 1/N 倍,使得模型的渗透距离也缩短 1/N 倍.按太沙基的固结理论,固结度 U 按照以下公式计算:

$$U = 1 - \beta \cdot e^{-\lambda T_v} \quad (2)$$

式中: β, λ 均为固结系数,离心模型场中, $\beta_p = \beta_m, \lambda_p = \lambda_m, T_v$ 为时间因数.

因此,当原型与模型达到相同固结度时,两者的时间因素 $T_{vp} = T_{vm}$,由于固结时间 $t = (H^2/C_v) T_v$ (其中,H 为固结路径长度, C_v 为固结系数).

原型中固结时间 $t_p = (H_p^2/C_v) T_v$,模型中固结时间 $t_m = [(H_p/N)^2/C_v] T_v$,因此,离心场中水体渗透固结时间比率为: $t_m/t_p = (1/N)^2$.

由于水体渗透过程导致黄土颗粒之间的黏土膜与盐晶膜的破坏,原始凝聚力和盐晶胶膜造成的加固凝聚力丧失,结构遭到破坏,发生湿陷现象^[9].且模型在 N 倍重力场下,水体入渗过程会对黄土颗粒产生显著动水压力,这会进一步加剧湿陷性黄土结构性的丧失.

本次模型试验制定相似比 $N=90$,根据模型试验相似原理^[10]和路堤模型量纲一表达式,制定相似法则如表 2 所示.

表 2 离心试验相似法则

Tab.2 Centrifuge scaling laws

参数	相似比(模型/原型)
长度	1/N
重度	N
应力	1
应变	1
时间	1/N ²
惯性	1/N
渗流、固结	1/N ²

试验采用的模型箱尺寸为 500 mm×360 mm×400 mm,路基填方高度 133 mm(原型 12 m),路基下湿陷性黄土地基厚度 200 mm(原型 18 m).试验首先模拟老路基的填筑过程,填筑完成后运行 8 年开展拓宽路基填筑工作,拓宽路基完成 3 年后进行强降雨模拟.地基土层采用原状土湿陷性土层整体构建,在湿陷性黄土层下布设 10 mm 厚度细砂层,既可以避免因土块与模型箱之间的缝隙产生路基断裂,又能吸附降水浸水过程中基底的流动水体.老路基模型高度为 133 mm,分 13 层填筑,每层厚度为 10 mm,最后一层厚度为 13 mm.老路基填筑过程分 9

级加速,即:10g, 20g, 30g, 40g, 50g, 60g, 70g, 80g 和 90g, 每级分别停留 43. 20, 10. 80, 4. 80, 1. 80, 1. 20, 0. 88, 0. 70 和 0. 53 min, 相当于每级填筑后停留 3 d. 老路基填筑完成后运行 520 min, 相当于老路基运营 8 年. 老路基运行 8 年后采用台阶法进行路基的拓宽工程, 分 13 级填筑, 各级停留时间与老路基相同, 新旧路基填筑完成后运行 3 年.

试验基于长安大学土工离心机工作平台研发了离心场降雨增湿装置, 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, 储水箱固定在离心机转臂上. 分散装置由有机玻璃密封制成, 其设计如图 1 所示, 其底板上分布 600 个直径 0. 5 mm 的小孔作为出水孔, 水分在离心力的作用下从这些孔排出. 为了能够实现均匀浸水, 将浸水装置分成了 4 个小隔间, 每个隔间各有 1 根长度相同的输水管供水, 试验过程中, 输水管连接储水箱, 由电磁阀控制. 考虑到地基黄土层的饱和度达到 85% 即达到了完全饱和湿陷状态, 储水箱中储备水量根据土层实际体积达到湿陷饱和度和来计算确定, 保证了降雨入渗量能够满足黄土地层的完全湿陷. 考虑到实际高速公路拓宽工程路面结构层的防水功能和边坡设施排水功能, 而坡脚集水沟位置, 特别是在强降雨条件下, 通常是诱发下部地基湿陷沉降变形的的主要区域, 本次试验重点关注拓宽后路基坡脚位置降水湿陷过程. 因此, 试验前需要通过调整使水滴重点分散于路基边坡坡脚位置. 为防止离心场中雨滴降落范围与降雨器的投影面积区偏移问题, 在正式试验前进行了试降雨分布调整,

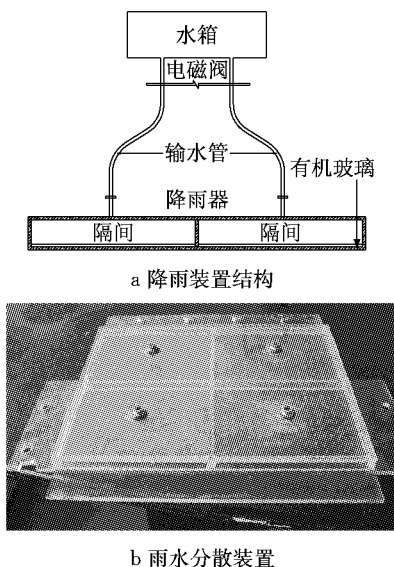
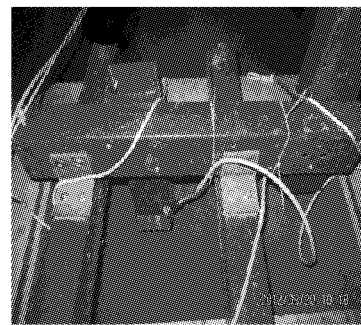
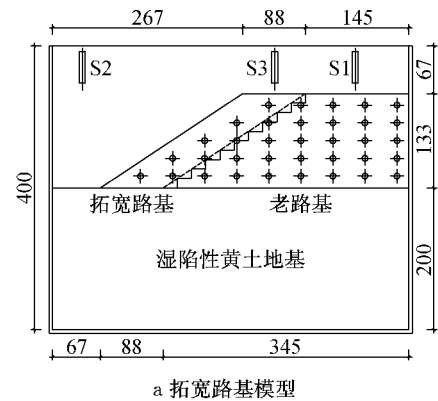


图 1 降雨浸水装置设计图
Fig.1 Design of rainfall simulation device

通过移动降雨器中的可移动隔板可以控制各个隔间的大小, 结合各个隔间的输水管上安装的独立开关, 即可控制降雨器降雨面积的大小, 并通过水分分布情况以及理论计算雨滴偏差位移, 调整降雨器降雨面积以及位置, 从而使水分降落在预定需要降雨区域. 因为试验所采用的模型比(N=90)较大, 为避免雨滴降落加速度过大破坏土体, 在路基坡面上铺设了一层渗透性较高的土工织布, 既能保护土体不被冲坏, 又能保证雨水的渗透.

1.2 试验测量系统的设计

试验采用德国制 NCDT1300 激光位移传感器进行新老路基竖向位移的测量, 该激光位移传感器分辨率达到 25 μm, 量程 100 mm, 误差小于等于 0. 2%, 满足试验测量要求. 根据试验具体情况, 如图 2 所示, S1, S2 和 S3 三个激光位移传感器分别位于老路行车道中央、拓宽路基路中和坡脚位置. 为观测路基与地基内部土体的变形情况, 在路基和地基中插入大头针做为位置标记点, 并利用高速摄影装置 (Sony slt A77) 记录标记点位移变化过程, 如图 2 所示. 在试验前和试验后分别记录每个大头针的坐标, 利用坐标的变化值即可得到土体的变化. 为减小大头针对土体的影响, 将 15 mm 长的大头针剪短, 只留下大头针端部极小部分做为标记, 并在模型箱壁上涂抹润滑剂降低土体与模型箱之间的摩擦力.



b 激光位移传感器安装
图 2 离心模型试验示意图(单位:mm)

Fig.2 Sketch of centrifuge model test (unit: mm)

2 试验结果分析

2.1 新旧路基内部变形规律

根据试验中大头针标注点相对位移测得路基内部竖向变形规律如图 3 所示. 可知路基各层土体表现出不同的变形规律,1 层和 2 层土体相对变形规律相似,反映了路基整体沉降规律,但 1 层土体变化值要明显大于第 2 层,这是由于第 1 层土体属于路基浅层土体,其相对变形规律近似反映出路基整体竖向变形量,且由于第 1 层位土体自重应力较小,对部地基土体沉降变产生的阻抗效应不明显,故其相对变形量数值较大. 3,4 层土体变形规律也相似,老路基中心区域因靠近模型箱壁,受摩擦力影响较大,自重应力未能克服摩擦力的影响,沉降较小,从而导致沉降盆线中心向拓宽路基方向移动,形成了第 1 个沉降凹面. 在老路基与新路基拼接部位,老路基沉降完成,新施加上的荷载较小,未能产生较大沉降. 在拓宽路基重心施加在拓宽地基上的荷载最大,产生了较大沉降,带动 3,4 层位土体形成了第 2 个相对变形凹面. 第 5 层土体深度最大,填筑时间最长,因此该部分土体在老路基的运营过程中沉降已经基本完成,旧路基拓宽后受新路基影响也较小,测点相对竖向变形不明显,但新旧路基拼接区域测点却产生明显凹面,最大单点相对变化值达到 38.4 mm,这是由于路基拼接下方地基土体在拓宽路基荷载作用下产生了明显的沉降,地基表面不均匀沉陷带动第 5 层土体产生相对沉降盆. 总体比较可知,路基体浅层土体相对位置变化反映了路基体整体竖向变形规律,深层土体相对位置变化反映了地基土体变相规律. 另外,从图 3 可以看出,降雨浸湿后,不同层位路基土体的沉降值都发生了突变,突变最为明显部位位于拓宽路基形心位置处,说明地基降雨入渗诱发的地基土体沉陷导致了路基土体不同程度的竖向变形.

2.2 新旧路基表层沉降变形规律

激光位移传感器 S1, S2 和 S3 的测量结果如图 4 和图 5 所示. 图 4 为老路基运行过程的监测结果. 图 5 为拓宽路基运行过程的监测结果. 从图 4 可知,路堤在修建完成后约 180 d 沉降已经基本完成,达到 5.6 cm 左右,占总沉降的 78%. 此后沉降增幅放缓,历经 7 年 6 个月的运行期其沉降值只增加了 1.6 cm,占总沉降值的 28%. 由于激光位移传感器 S2 的设置位置较为靠近模型箱壁,虽然采用了抗摩擦措

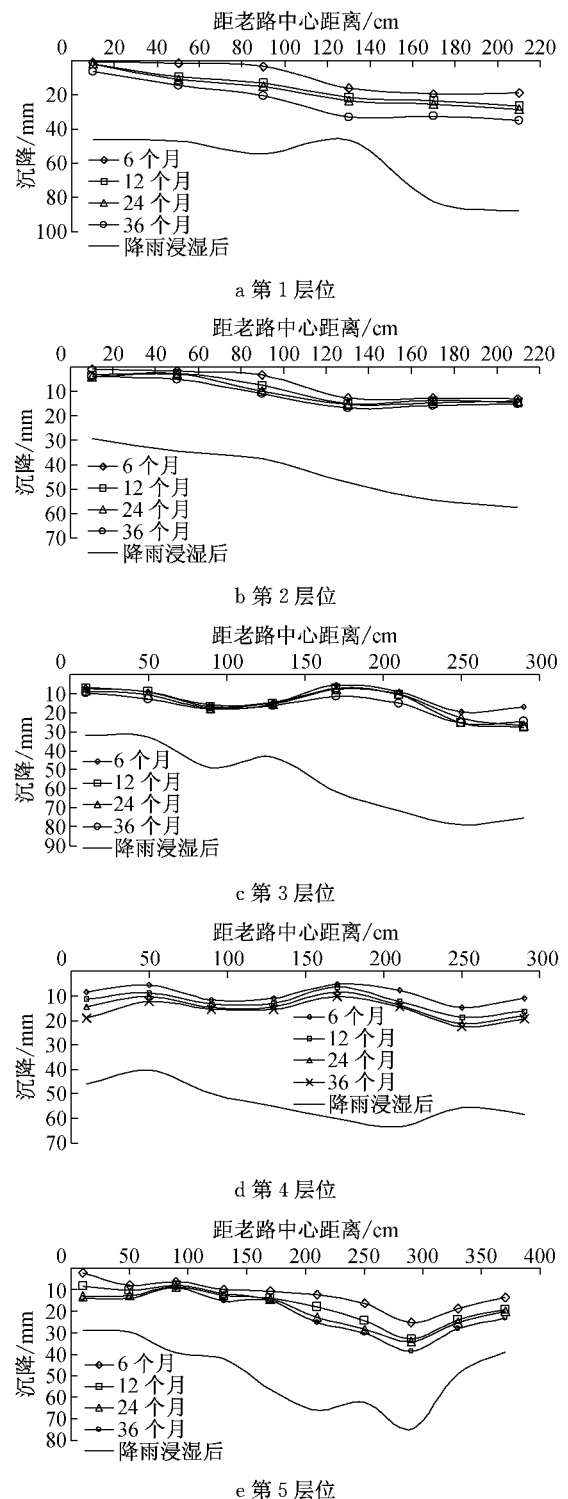


图 3 路基内部沉降曲线

Fig. 3 Settlement of subgrade internal

施,地基的沉降过程还是受到了影响,其沉降过程较为缓慢,经过约 900 d 的运行才基本沉降稳定,最终沉降值达到了 2.1 cm. 另外,可以看出,地基的沉降在整个沉降过程中占据主导地位,其沉降值占总沉降的 80% 左右,路基总沉降规律与地基沉降规律相符.

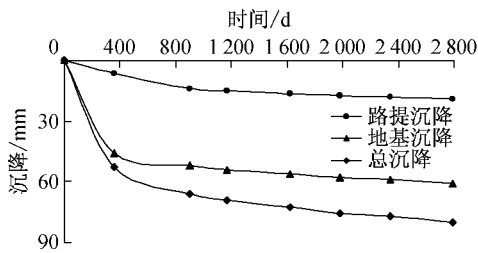


图 4 老路基测点沉降量时域图

Fig. 4 Settlement schemes of measuring points in old subgrade

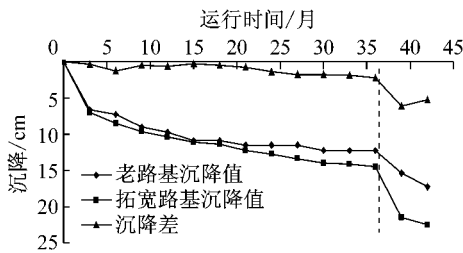


图 5 拓宽路基测点沉降量时域图

Fig. 5 Settlement schemes of measuring points in widen subgrade

从图 5 可以看出,在运营 3 个月之后新老路基开始出现差异沉降并逐渐扩大,但是发展较为缓慢,差异沉降始终维持在 0.5 cm 左右. 1.5 年以后差异沉降开始发展,运营 3 年后差异沉降由 0.5 cm 发展到了 2.2 cm,扩大了 4.4 倍. 停机检查发现在新老路基拼接带已经出现裂缝. 差异沉降产生的原因是在新增加的路基荷载作用下,其影响区域的路基以及部分老路堤也会产生新的沉降,从而新老路基之间出现不均匀沉降,导致了裂缝的出现. 拓宽路基运营 3 年后对模型实施了降雨,浸水完成 3 个月后,老路基因浸水湿陷突变了 5.3 cm,总沉降达到了 15.4 cm,新路基因浸水湿陷突变了 8.1 cm,总沉降达到了 21.5 cm,新老路基沉降差达到了 6.1 cm. 停止运行后观察发现,拓宽路基已经破坏,产生了拓宽路基整体滑坡现象. 这说明在拓宽路基中降雨对新路基的影响较大,原因是在路面结构以及边坡防护结构的保护下,雨水只能通过地表径流汇集在坡脚,当坡脚排水不畅时,雨水入渗从而导致湿陷性黄土地基的破坏. 根据黄土入渗规律以及黄土的垂直空隙发育特点,垂直入渗深度远大于水平入渗宽度,从而对新路基影响大、对老路基影响小. 试验结束后在模型内部取土测试含水量后绘制含水量等值线图,如图 6 所示. 从图 6 可以看出,坡脚雨水聚集并未导致下部地基土体含水量均匀分布,坡脚下部浸水明显,部分土体含水量高达 28%,土体处于高度饱和和湿软

状态,老路基下地基含水量却明显偏低.

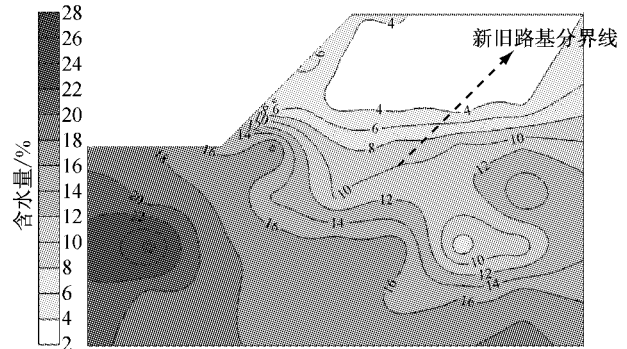


图 6 含水量等值线图

Fig. 6 Contour map of moisture content

2.3 路基荷载下地基浸水入渗规律及破坏机制

路基降雨破坏过程可以分为三个阶段. 第一个阶段是雨水汇集在坡脚并开始入渗,在入渗过程中雨水首先通过这些竖向孔隙向下渗透,大厚度湿陷性地基在新旧路基荷载的作用下,发生湿陷现象. 破坏后的黄土颗粒被水分携带向下移动,竖向孔隙进一步扩大,形成湿陷溶洞,如图 7a 所示,湿陷溶洞出露地表,坡脚有早期裂纹形成. 第二阶段,随着强降雨入渗持续一段时间后,坡脚积聚水分不断入渗,竖向孔隙继续发展,最终个别湿陷溶洞扩大,成为降雨入渗的主要通道,雨水不断入渗,水分开始横向浸润移动,发生湿陷的土体进一步扩大,湿陷性黄土地基因差异湿陷而产生地表差异沉降,诱发上部路基体因不均匀变形而产生附加拉应力,如图 7b 所示,路堤边坡区域产生明显裂纹. 第三阶段,随着湿陷进一步发展,地基整体发生湿陷,路基表层新旧拼接带处也出现裂缝,路堤破坏,如图 7c 所示. 由于试验采用的模型箱较小,模型较小,受模型箱壁影响,拓宽路基边坡未形成连续滑动面. 整体规律显示,由于湿陷性黄土所具备的特殊工程特征,使得在深厚黄土地区开展高速公路改扩建工程,不仅存在差异沉降过大所导致的一系列工程病害,还将面临地基增湿整体失稳所带来的更为严重的路基路面蠕滑、滑移等技术难题.

3 结论

(1) 拓宽路基荷载影响下,新路基以及部分老路堤会产生新的沉降,新老路基差异沉降初期发展较为缓慢,运营 3 年后差异沉降由 0.5 cm 发展到了 2.2 cm,扩大了 4.4 倍. 地基的沉降在整个路基沉降中占据主导地位,其沉降值占路基总沉降的 80% 左

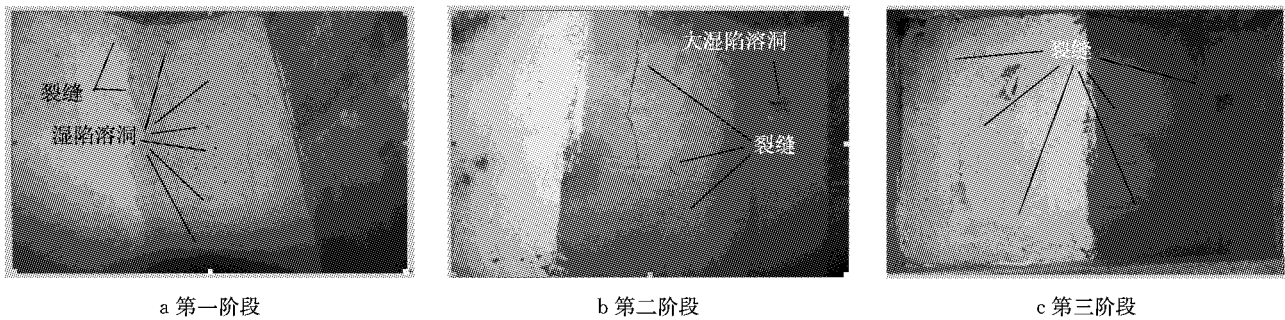


图 7 黄土地基湿陷条件下拓宽路基破坏过程

Fig.7 Failure process of widening roadbed with foundation collapse

右,差异沉降将导致新老路基拼接带出现裂缝。

(2) 路基体浅层土体相对变形反映了路基体整体竖向沉降规律,深层土体相对变形反映了地基土层沉降规律,且路基内部变形也能够反映出地基土体因降雨入渗诱发的地基变形规律。

(3) 雨水入渗导致下部湿陷性黄土地基浸湿,黄土层垂直入渗深度远大于水平入渗宽度,雨水聚集入渗导致下部地基土体含水量非均匀分布,坡脚下部浸水明显,部分土体含水量高达 28%左右,土体处于高度饱和湿软状态,老路基下地基含水量却明显偏低。

(4) 湿陷性黄土层拓宽路基增湿破坏为渐进过程,降雨入渗首先在湿陷性黄土层内部产生非均匀湿陷,导致新旧路基体产生不同程度的差异变形,路基边坡首先出现裂缝,进而在新旧路基拼接带处也出现裂缝,最终面临因路基体整体失稳所带来的更为严重的路基路面塌陷、滑移等问题。

参考文献:

- [1] 黄琴龙,凌建明,唐伯明,等.新老路基不协调变形模拟试验研究[J].公路交通科技,2004,21(12):18.
HUANG Qinlong, LING Jianming, TANG Boming, *et al.* Experimental research on incoordinate deformation between existing subgrade and the widening one[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21(12): 18.
- [2] 刘金龙,张勇,陈陆望,等.路基拓宽工程的基本特性分析[J].岩土力学,2010,31(7):2159.
LIU Jinlong, ZHANG Yong, CHEN Luwang, *et al.* Basic characters of road widening engineering [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(7): 2159.
- [3] 傅珍,王选仓,陈星光,等.拓宽路基差异沉降特性和影响因素[J].交通运输工程学报,2007,7(1):54.
FU Zhen, WANG Xuancang, CHEN Xingguang, *et al.* Differential settlement characteristics and influencing factors of idening subgrade [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(1): 54.
- [4] Allersm A H G B, Ravensw A A Y L, Vos E. Investigation of road widening on soft soils using a small centrifuge [J]. Transportation Research Record, 1994(1462): 47.
- [5] Han J, Akins K. Use of geogrid-reinforced and pile-supported earth structures [J]. Geotechnical Special Publication, 2002 (116): 668.
- [6] 颜斌,徐张建.低能级强夯前后路基黄土湿陷性研究[J].长安大学学报:自然科学版,2009,29(4):25.
YAN Bin, XU Zhangjian. Subgrade loess collapsibility and after low level tamping [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(4): 25.
- [7] 刘保健,支喜兰,谢永利,等.公路工程中黄土湿陷性问题分析[J].中国公路学报,2005,18(4):28.
LIU Baojian, ZHI Xilan, XIE Yongli, *et al.* Analysis of problems on loess hydrocompaction in highway engineering [J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(4): 28.
- [8] 赵偲聪.土质边坡降雨离心模型试验研究[D].成都:西南交通大学,2014.
ZHAO Sicong. Centrifuge model tests on the engineering soil slope under rainfall condition [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [9] 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.
XIE Dingyi. Exploration of some new trendencies of in research of loess soil mechanics [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(1): 3.
- [10] Taylor R N. Geotechnical centrifuge technology[M]. London: Blackie Academic and Professional, 1995.