

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2023070723081975

文章编号:1674-599X(2023)04-0017-07

引用格式:段丹军,杨焯宇.降雨入渗对黄土拓宽路基变形影响的离心模型试验[J].交通科学与工程,2023,39(4):17-23.

Citation:DUAN Danjun, YANG Xuanyu. Centrifuge model test of influence of rainfall infiltration on deformation in loess widened subgrade[J]. J. Transp. Sci. Eng., 2023, 39(4): 17-23.

# 降雨入渗对黄土拓宽路基变形影响的离心模型试验

段丹军,杨焯宇

(山西省交通科技研发有限公司,山西太原 030032)

**摘要:**为探究降雨入渗对黄土拓宽路基造成与一般路基的变形差异,该研究以典型黄土路基及其拓宽路基为研究对象,建立离心试验模型,研究在降雨入渗条件下典型黄土路基及其拓宽路基的变形情况,同时监测这两种路基内部含水率及土压力的变化情况。研究表明:在降雨入渗作用下,典型黄土路基顶面中心位置的沉降变形最大,而拓宽路基路肩位置的沉降变形最大,随着降雨量的增加,变形增加幅度逐渐变小;拓宽路基坡脚位置与地基均出现隆起变形,路基边坡中部位置内陷;路基内部含水率存在动态平衡过程,影响路基整体变形。

**关键词:**道路工程;降雨入渗;黄土路基;拓宽路基;离心模型试验;沉降变形

中图分类号:U416.1

文献标志码:A

## Centrifuge model test of influence of rainfall infiltration on deformation in loess widened subgrade

DUAN Danjun, YANG Xuanyu

(Shanxi Transportation Technology Research & Development Co., Ltd., Taiyuan 030032, China)

**Abstract:** To explore the influence law of rainfall infiltration on widening deformation in loess subgrade, and reveal the deformation differences between loess widened subgrade and general subgrade under the action of rainfall infiltration. This paper takes typical loess subgrade and widened loess subgrade as the research object, and the centrifuge test model was established to study the deformations of typical loess subgrade and widened loess subgrade under the condition of rainfall infiltration. The changes was monitored for water content and soil pressure inside the two subgrades. The results showed that the settlement deformation was the largest at the top surface center position for the typical loess subgrade under the action of rainfall infiltration, while the settlement deformation at the shoulder was the largest for the widened subgrade. With the increase of rainfall, the increasing extent of deformation gradually decreased. The foundation at the slope foot of widened subgrade was uplifted and deformed, and the central position of subgrade slope was invaginated. There was a dynamic equilibrium process of water content in subgrade, which affects the overall deformation of subgrade.

**Key words:** road engineering; rainfall infiltration; loess subgrade; widened subgrade; centrifuge model test; settlement deformation

含水率的变化将影响路基的稳定。当强降雨发生时,黄土路基边坡会出现滑塌、坍塌等病害。

当拓宽黄土路基时,受降雨的影响,路基会出现不均匀沉降。降雨入渗会引起黄土路基特别是黄土

收稿日期:2023-07-07

基金项目:山西交通控股集团有限公司科技项目(19-JKKJ-4)

作者简介:段丹军(1975—),女,山西省交通科技研发有限公司正高级工程师。

拓宽路基产生一系列工程的病害,甚至引发地基湿陷,导致整体路基失稳等严重病害<sup>[1-2]</sup>。近年来,中国中西部地区广泛覆盖黄土,其高速公路改扩建项目也逐渐增多,在拓宽处治和运营的过程中,难免遇到强降雨的情况。比如2021年10月,山西省遭受历时7 d的强降雨,晋南地区部分黄土路基及边坡出现沉降、滑塌等病害,对当地交通出行造成了极大困难及安全隐患。老路基早已固结沉降,降雨入渗并不会大幅度影响路基内部含水率,但新拓宽路基含水率将有较大变化,且拓宽后新旧路基含水率存在动态平衡现象,这样直接影响拓宽路基横、纵向的变形。因此,本研究针对降雨入渗引发黄土路基以及拓宽黄土路基的变形情况提出工程处治措施。

关于黄土路基受含水率变化影响的研究已经取得较为丰硕的成果。李家春等<sup>[3]</sup>利用人工模拟降雨装置和路堤土工模型,在不同初始含水率和不同降雨条件下,进行了黄土路堤边坡湿润峰和入渗率的试验,分析了降雨历时和降雨强度对黄土路堤边坡稳定性敏感程度及入渗变化规律。沈波等<sup>[4]</sup>对压实黄土路基边坡在七因素变化条件下进行降雨冲刷试验,推导了压实黄土边坡降雨冲刷强度经验公式,以及坡面最大冲刷强度的临界坡度。关于含水率变化引起的拼接路基差异沉降的控制技术也取得了系列成果。翁效林等<sup>[5]</sup>研制了离心场土工构造物变形测试系统,进行离心试验,研究了浸水增湿后拓宽路基的沉降变形特征和拓宽地基强夯处治效果。黄琴龙等<sup>[6]</sup>在路基拓宽室内试槽试验中预填一定厚度的易溶性化肥,再注水溶解,模拟了新老路基的形成。傅珍等<sup>[7]</sup>分析了拓宽路基差异沉降特性和影响因素。

关于离心试验模型方面取得了一些成果。张军辉<sup>[8]</sup>建立了高速公路加宽工程加筋路堤离心模型。曹杰等<sup>[9]</sup>在不同边界条件下,建立了黄土高填方沉降离心模型。然而,目前针对典型黄土路基及黄土拓宽路基受降雨入渗情况建立模型,以及此类情况下引发的路基变形特性和边坡变形规律分析的研究鲜见。

因此,本研究在前人的成果基础上,研制降雨入渗测试系统,升级模型试验变形监测技术,分析典型黄土路基降雨入渗后含水率的变化情况以及黄土拓宽路基降雨入渗后的变形规律,检验黄土拓宽路基采取的处治措施,针对性地提出工程技术处治措施。

## 1 离心模型试验设计

### 1.1 相似比

本模型试验所涉及的相关参数可表达为 $F(\sigma, \rho, \varphi, g, l, \varepsilon, t)=0$ 。其中, $\sigma$ 、 $\rho$ 、 $\varphi$ 、 $g$ 、 $l$ 、 $\varepsilon$ 、 $t$ 分别为土中应力、土体密度、土体内摩擦角、重力加速度、模型尺寸大小、土工格室应变、运行时间。根据相似理论,计算土体各关键参数的相似比: $C_\sigma=n^2, C_\rho=n^2, C_\varphi=n, C_g=n, C_l=n^2, C_\varepsilon=n, C_t=n^2$ 。其中, $n=L_p/L_M, L_p$ 为原型几何尺寸, $L_M$ 为试样几何尺寸。

### 1.2 试验材料

#### 1) 典型黄土。

模型试验取山西某改扩建高速公路沿线的典型黄土作为填料,通过室内重型击实、界限含水率、固结及渗透等试验,获得重塑黄土基本物理性质的结果见表1。

表1 典型黄土基本物理力学试验参数

Table 1 Basic physical and mechanical test parameters of typical loess

土样名称	重型击实试验		固结试验		渗透试验	液限/ %	塑限/ %	粒径级配/ %		
	最佳含水率/ %	最大干密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	压缩系数/ MPa <sup>-1</sup>	压缩模量/ MPa	渗透系数/ (cm·s <sup>-1</sup> )			>2.000 mm	[2.000,0.075] mm	<0.075 mm
黄土	11.2	1.96	0.109	13.3	2.443×10 <sup>-6</sup>	22	14	1.7	36.1	62.2

#### 2) 土工格室。

模型材料以模拟土工格室的尺寸大小、格室整体的变形模量和强度为主要依据。在实际工程中,土工格室材料变形以5%作为容许的最大变形量,并用此变形量对应的强度作为在正常使用条件下

的极限强度。制作模型时,很难找到强度和厚度与理论值完全相同的材料。因此,选用力学指标与其接近的材料,实体工程中铺设的土工格室宽度为50.00 mm,当变形量为5%时,其拉伸屈服强度为25.9 MPa,模型材料的实际宽度为10.00 mm,厚度为

0.06 mm,实际测量拉伸屈服强度为23.3 MPa,为理论值的90%,符合试验要求。

### 1.3 降雨模拟

本次离心试验研制了降雨模拟系统,其工作原理是:将高速流动、高压的液体挤压进入喷嘴,撞击在喷嘴内部放置的铁片,反弹后形成雾化颗粒,并通过喷嘴出口喷出。其主要优点为:①离心场雾化雨滴非常小,合理布设雾化喷头位置,可以使降雨更均匀,更好地模拟原型降雨。②通过控制进水管的通水时间来控制降雨时间。③降雨喷头均匀布置在模型箱的中间断面,水平间距12 cm,可覆盖模型顶部全部区域。

本次离心试验共进行4次降雨,前3次降雨均为黄土路基填筑完成后进行降雨,每次降雨量均为500 ml(相当于晋南地区1 a降雨量),路基变形稳定后再进行下一次降雨;第4次降雨为加铺拓宽路基且路基变形稳定后进行,降雨量也为500 ml。

### 1.4 模型设计与制作

模型试验采用长江科学院土工离心试验机,模型箱尺寸大小为100 cm×40 cm×80 cm,模拟黄土地基厚15.00 m,路基填高8.00 m,单侧加宽4.00 m。为能直观地模拟典型黄土路基及其拓宽路基降雨入渗的变形,在试验中对模型土层的制备须量化控制,尽量与黄土路基拓宽措施保持一致,包括新旧路基搭接台阶宽度和高度、土工格室布置层位和层数、路基和地基的压实度等。其中,模型新旧路基搭接台阶宽为1.5 m,高为1.0 m;搭接台阶最低、中间及最高位置分别设置一层土工格室;黄土地基压实度以85%控制,地基以上至下路床的压实度按90%控制,上路床的压实度按93%控制。

模型内部埋设孔隙水压力、土压力传感器,监测路基内部含水率及土压力随时间的变化情况。采用4个激光位移计对路基顶面中部、路肩、路基边坡中部、路基坡脚地基顶面4个位置进行变形监测。离心试验模型及传感器布置示意图如图1所示。

具体试验步骤为:①将地基土层晒干、破碎,配制最佳含水率,静置24 h,保证水分均匀,按照设定密度分层铺筑、击实;②吊装模型箱至离心机的吊篮内,同时吊装配重至吊篮内;③安装降雨装置和位移传感器,按照设定位置安装供水箱和降雨喷头;④固定激光位移传感器,连接传感器信号线,测

试采集系统;⑤加速度逐级增大至设计加速度,本次离心试验运行加速度分别为10g、20g、30g、40g、50g,即相似比为50;⑥离心机保持50g加速度运行至变形稳定后,开始降雨模拟,再次运行至稳定后进行第二次降雨,如此重复,在三次降雨模拟变形稳定后停机;⑦开挖原黄土路基的台阶,铺筑拓宽路基,严格控制开挖台阶宽度与高度,并按要求铺设土工格室替代材料,分层铺筑压实;⑧开始第二次离心试验,运行至拓宽路基变形稳定后,再次进行降雨且变形稳定后,结束试验;⑨试验完成后,通过开挖模型不同深度土样,测量其含水率。

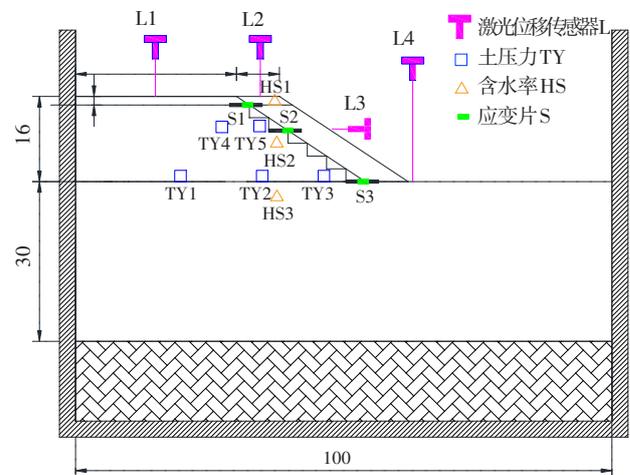


图1 离心模型布置(单位:cm)

Fig. 1 Centrifuge model arrangement (unit: cm)

### 1.5 传感器率定

试验前对加速度为20g、40g、60g、80g、100g时的孔隙水压力及土压力传感器测量值进行率定,但激光位移传感器不会产生偏移,未做率定,率定结果见表2及图2。

表2 不同加速度时传感器测量值和计算值的对比

Table 2 Comparison of sensor measurements and calculated values at different accelerations

离心加速度	计算值/kPa	传感器测量值/kPa								最大相对误差/%
		HS1	HS2	HS3	TY1	TY2	TY3	TY4	TY5	
20g	100	98	96	97	99	97	98	97	97	0.7
40g	200	197	194	196	202	194	197	191	196	1.2
60g	300	297	295	288	300	291	300	291	300	0.0
80g	400	392	396	392	406	389	398	387	394	1.6
100g	500	499	503	484	501	479	493	488	494	0.7

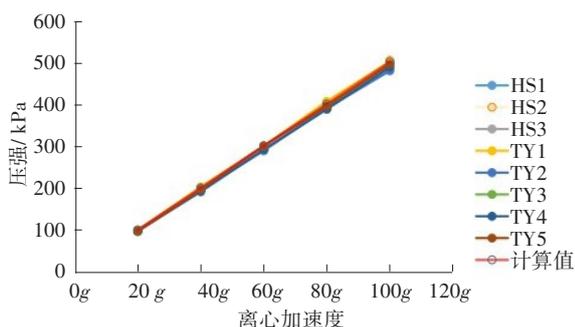


图2 不同加速度时传感器测量值和计算值的对比曲线

Fig. 2 Comparison curves of sensor measurements and calculated values at different accelerations

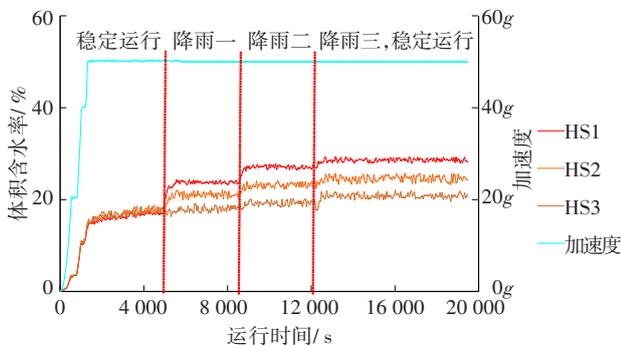
由表2和图2可知,试验所采用的孔隙水压力与土压力传感器量测值呈线性关系,测量结果稳定,其与计算值吻合度达99%,能够满足试验要求。

## 2 结果分析

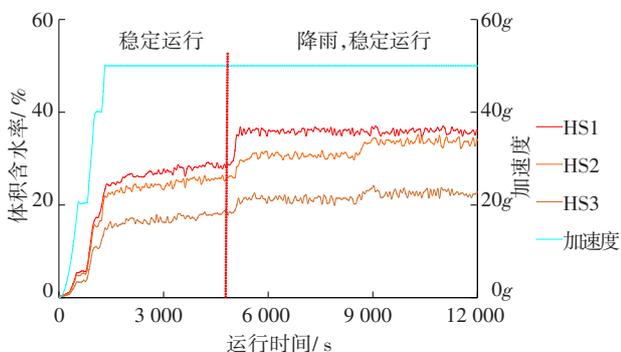
### 2.1 含水率

#### 2.1.1 典型黄土路基降雨入渗含水率变化

黄土路基受降雨入渗后体积含水率随时间的变化规律如图3(a)所示。



(a) 黄土路基



(b) 黄土拓宽路基

图3 黄土路基及其拓宽路基降雨入渗后体积含水率变化

Fig. 3 Changes in volumetric water content after rainfall infiltration for loess subgrade and its widened subgrade

从图3(a)可以看出:

1) 总体上,随着降雨入渗,路基及地基的体积含水率均增大。其中,路基上部、中部的体积含水率变化较大,地基的体积含水率变化较小。其主要原因:地基上面覆盖路基,埋深最大,水分入渗慢,体积含水率变化最小。

2) 随着降雨次数增加,虽每次降雨量相同,但路基及地基内部的体积含水率增加幅度降低。第一次降雨145 d(5 000 s)后,路基上部体积含水率由原来的15%增加到23%,路基中部体积含水率由原来的15%增加到20%,地基内体积含水率由原来的15%增加到17%;第二次降雨后,路基上部、中部及地基的体积含水率分别增大4个百分点、4个百分点、2个百分点;第三次降雨后,路基上部、中部及地基的体积含水率分别增大2个百分点、1个百分点、1个百分点。

3) 降雨开始到体积含水率稳定时间约为20 d(700 s),表明降雨到路基内部体积含水率相对稳定的时间约为20 d(700 s)。

#### 2.1.2 黄土拓宽路基降雨入渗含水率变化

黄土路基拓宽稳定后,再模拟强降雨,含水率测试点仍为黄土路基原体积含水率测试点。拓宽路基后降雨入渗引起的路基及地基的体积含水率变化情况如图3(b)所示,从图3(b)可以看出:

1) 拓宽路基稳定后,旧路基内的体积含水率仍保持原体积含水率,路基上、中部以及地基分别为29%、25%、20%。再对拓宽后路基进行模拟降雨,路基上、中部以及地基的体积含水率分别增大到36%、32%、22%,增加幅度分别为7个百分点、7个百分点、2个百分点,远大于黄土路基受同样降雨入渗后的含水率。其主要原因:拓宽处治压实效果远不如原路基压实效果。因此,路基拓宽时,建议采取强夯措施处治,以保证拓宽路基的压实质量。

2) 模型继续运行260 d(9 000 s)后,即使没再降雨,路基中部含水率仍有增加,增幅为2个百分点,与路基上部36%的体积含水率逐渐接近,表明路基内部含水率在动态调整,逐渐趋向一致,这与文献[10]结论一致。从图3(b)还可以看出,此时路基内部的上部高体积含水率向下部传输,保持动态平衡。与因降雨入渗引起路基体积含水率的变化时间相比,路基内部含水率动态平衡所需的时间更长。

试验完成后,检测模型不同断面含水率,得到

黄土拓宽路基质量含水率分布,如图4所示。

从图4可以看出,模型试验结束后,路基及地基含水率呈自上向下逐渐递减的规律,路基顶面的质量含水率最大达24%,路基中部的质量含水率为21%,受路基覆盖的地基的质量含水率为15%~16%(在该典型黄土的塑限附近)。

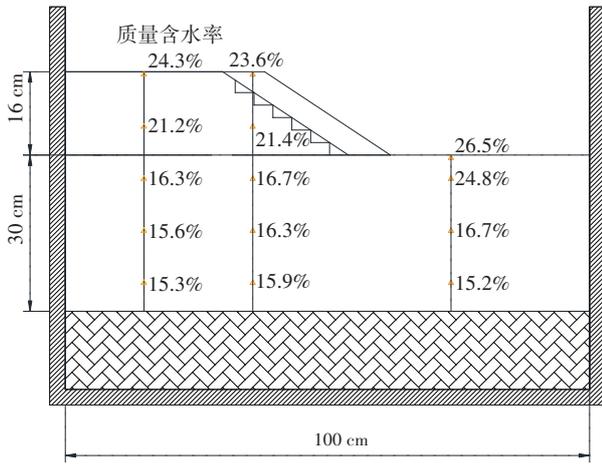


图4 试验后开挖测试得到的断面质量含水率分布

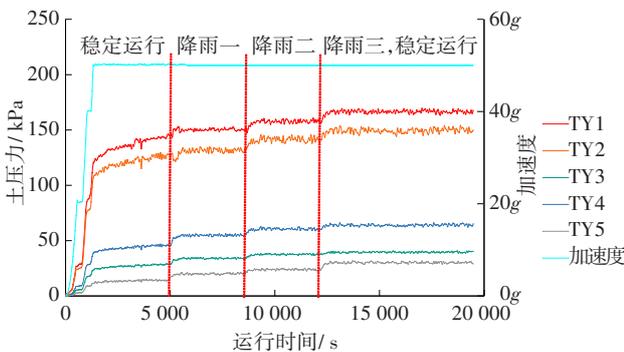
Fig. 4 Distribution of cross-sectional mass water content obtained by the excavation test after the test

## 2.2 土压力变化

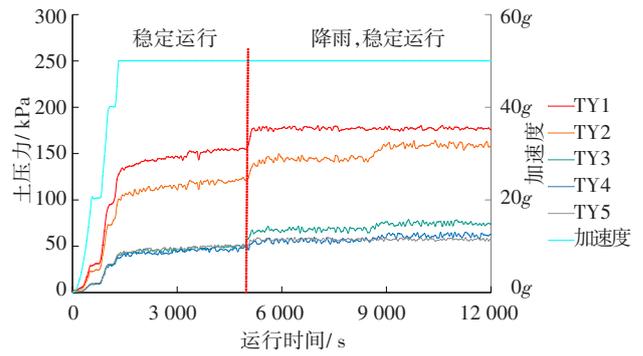
黄土路基降雨入渗以及固结沉降过程的土压力变化情况如图5(a)所示,在后降雨入渗以及固结沉降过程中,路基内的土压力变化情况如图5(b)所示。

从图5可以看出:

1) 随着加速度的逐级增大,土压力也逐级增大.当加速度为50g时, TY1~TY5的测量值分别为149、128、29、45、15 kPa;随着降雨入渗,土压力有所波动,但其总体在增大,三次降雨结束后,土压力分别为165、153、40、64、30 kPa。



(a) 第一次运行黄土路基



(b) 第二次运行黄土拓宽路基

图5 黄土路基及其拓宽路基土压力随时间变化关系曲线  
Fig. 5 Relation curves of earth pressure changing with time for loess subgrade and its widened subgrade

2) 路基拓宽并经历一次降雨后,随着加速度和土压力逐级增大, TY1~TY5的测量值分别为176、161、74、61、57 kPa。比较黄土路基固结沉降后的土压力和拓宽后的,以及由降雨入渗后的两者土压力可知,即使拓宽后经历了降雨,路基内土压力的变化也不大。

## 2.3 变形

### 2.3.1 典型黄土路基降雨入渗变形

典型黄土路基变形随时间的变化曲线如图6所示。

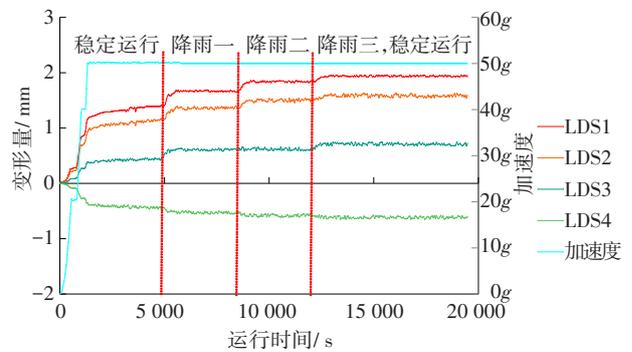


图6 典型黄土路基降雨入渗变形情况

Fig. 6 Rainfall infiltration deformation of typical loess subgrade

从图6可以看出:

1) 随着加速度的逐级增大,沉降变形量逐渐增大,水平位移LDS3的变形量也逐渐增大;当加速度为50g运行至变形趋于稳定时, LDS1、LDS2和LDS4的沉降值分别为1.41、1.27、-0.44 mm(转化后的原型值分别为70.5、63.5、-22.0 mm,负值表示隆起),水平位移LDS3为0.45 mm(转化后的原型值为22.5 mm),黄土路基固结沉降过程中,路基顶面中部位置沉降量最大达70.5 mm。

2) 模拟降雨工况,离心机继续运行至变形稳定,三次降雨引起的LDS1、LDS2和LDS4的变形增量分别为0.68、0.50、-0.20 mm(转化后的原型值分别为34.00、25.00、-10.00 mm),LDS3的变形增量为0.28 mm(转化后的原型值为14.00 mm),表明降雨入渗对黄土路基变形影响最大部位为路基顶面中部,其次是路基顶面肩部,路基坡脚处有隆起变形,边坡中部也有内陷情况,但隆起与内陷变形量较小,可忽略不计。

分析三次降雨入渗后对典型黄土路基变形影响情况,变形增量见表3。由表3可知,路基顶面中间位置随降雨次数增加,沉降变形量减少,由第一次降雨后的增量0.38 mm(相当于增加19 mm),降为第三次降雨后增量仅为0.11 mm(相当于增加6 mm)。

表3 降雨入渗次数与路基变形增量

Table 3 Rainfall infiltration times and subgrade deformation increment mm

降雨次数	路基变形增量			
	LDS1	LDS2	LDS3	LDS4
1	0.38	0.27	0.21	-0.11
2	0.19	0.19	-0.03	-0.05
3	0.11	0.04	0.10	-0.04

### 2.3.2 黄土拓宽路基降雨入渗变形

黄土路基拓宽后再经历降雨入渗后路基变形随时间的变化规律如图7所示。黄土路基拓宽后降雨入渗对路基变形的影响见表4。

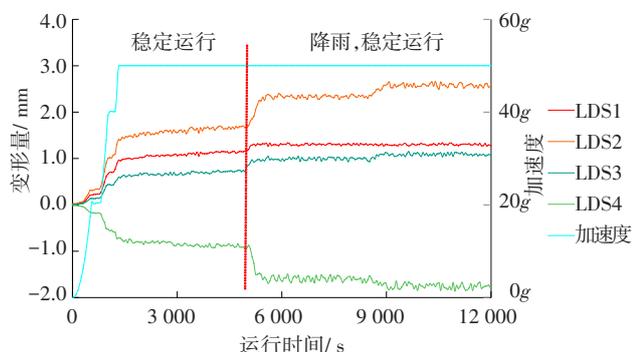


图7 黄土拓宽路基变形随时间变化关系曲线

Fig. 7 Relation curves of deformation changing with time for loess widened subgrade

由图7和表4,可得出以下结论:

黄土路基拓宽后,最大沉降变形为路基顶面肩部位置,而不是路基顶面中部位置。黄土路基路堤

中心和拓宽路基路肩处的沉降差为1.28 mm(转化后的原型值为64 mm);水平位移LDS3为1.71 mm(转化后的原型值为85.5 mm),即路基边坡中部内陷85.5 mm;LDS4为1.83 mm(转化后的原型值为91.5 mm),说明路基坡脚位置向上隆起91.5 mm。其原因是新拓宽路基整体产生向下滑移的趋势,引起路肩下滑,路基边坡内陷,地基底部向上隆起等变形情况。

表4 黄土路基拓宽后降雨入渗对路基变形影响

Table 4 Influence of rainfall infiltration on subgrade deformation after loess subgrade widening mm

传感器	拓宽稳定时变形量	降雨初步稳定后变形量	降雨动态平衡后变形量
LDS1	1.09	1.29	1.27
LDS2	1.56	2.30	2.58
LDS3	0.65	1.03	1.12
LDS4	-0.84	-1.62	-1.83

离心试验结束后,黄土拓宽路基受降雨影响后的变形规律如图8所示。从图8可以看出,由于下滑,拓宽路基的顶部从搭接位置开始发生纵向裂缝,同时在靠近路基坡脚位置地基向上隆起,引起地基开裂现象。这也进一步印证了2021年10月份山西省连续强降雨引起晋南地区大量黄土路基边坡局部滑塌病害的原因。因此,为防止因强降雨而引起该灾害的发生,应在黄土路基边坡采取种植灌木或者生态草皮等固结边坡土体的主动防护措施。而针对黄土拓宽路基,还应在坡脚采取反压措施,减少拓宽路基的侧滑趋势,有效控制差异沉降及裂缝病害。

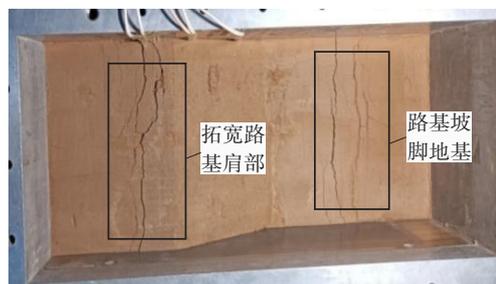


图8 离心试验结束模型变形情况

Fig. 8 Model deformation at the end of centrifuge test

本研究采用的黄土拓宽路基模拟措施,参考了实体工程的实施结果。为研究其变形规律,采取降低压实度和加强降雨量两个措施。从模型试验结

果发现,拓宽路基差异沉降路拱横坡度的增大值为0.8%,较规范<sup>[10]</sup>要求的大。

### 3 结论

通过对黄土路基以及拓宽路基进行降雨入渗离心模型试验,得到以下结论:

1) 黄土路基受降雨入渗影响,路基顶面中部位置的沉降变形最大,路肩位置的变形较小;黄土拓宽路基受降雨入渗影响,路基顶面肩部位置的沉降变形最大。与未拓宽黄土路基相比,拓宽路基边坡中部内陷变形较大,拓宽路基坡脚位置隆起变形显著,引起整体侧滑。为减少黄土拓宽路基的侧滑,建议应在路基坡脚地基处采取反压措施,同时边坡采用柔性主动防护,减少强降雨引起的边坡坍塌和路基与地基裂缝病害。

2) 黄土路基受降雨入渗后,路基内部含水率逐渐增大,随着降雨次数增加,含水率增加幅度降低。黄土路基内部含水率存在动态平衡,一般动态平衡需260 d(9 000 s)左右,但受季节影响,动态平衡时间会有一定波动。

3) 在降雨入渗作用下,无论是对黄土路基,还是拓宽路基,其内部土压力无较大影响。

4) 在降低压实度、增加降水量的情况下,黄土拓宽路基的差异沉降导致路拱横坡度增大0.8%,大于规范<sup>[10]</sup>设计细则的要求。

#### 参考文献(Reference):

- [1] 王迎迎. 降雨入渗及交通荷载作用下路基土体变形特性研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2016.  
WANG Yingying. Research on deformation characteristics of roadbed induced by rainfall infiltration and traffic loads [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2016.
- [2] 张军辉. 不同软基处理方式下高速公路加宽工程变形特性分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(4): 1216-1222. DOI: 10.16285/j.rsm.2011.04.035.  
ZHANG Junhui. Analysis of deformation behavior of expressway widening engineering under different foundation treatments [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(4): 1216-1222. DOI: 10.16285/j.rsm.2011.04.035.
- [3] 李家春, 崔世富, 田伟平. 公路边坡降雨侵蚀特征及土

的崩解试验[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2007, 27(1): 23-26, 49. DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2007.01.006.

LI Jiachun, CUI Shifu, TIAN Weiping. Erosion characteristic of road slope and test of soil disintegration [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2007, 27(1): 23-26, 49. DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2007.01.006.

- [4] 沈波, 艾翠玲, 徐岳, 等. 公路路基压实黄土坡面人工降雨侵蚀试验[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2004, 24(6): 11-14. DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2004.06.003.

SHEN Bo, AI Cuiling, XU Yue, et al. Corrode test of highway impact loess roadbed slope surface with man-made rainfall [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2004, 24(6): 11-14. DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2004.06.003.

- [5] 翁效林, 王玮, 刘保健. 湿陷性黄土拓宽路基变形特性及强夯法处治效应模型试验[J]. 中国公路学报, 2011, 24(2): 17-22. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2011.02.004.

WENG Xiaolin, WANG Wei, LIU Baojian. Model test on deformation characteristics of widening collapsible loess roadbed and dynamic compaction method treatment effect [J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(2): 17-22. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2011.02.004.

- [6] 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): 18-21. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2004.12.005.

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): 18-21. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2004.12.005.

- [7] 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): 54-57. DOI: 10.3321/j.issn:1671-1637.2007.01.012.

FU Zhen, WANG Xuancang, CHEN Xingguang, et al. Differential settlement characteristics and influencing factors of widening subgrade [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(1): 54-57. DOI: 10.3321/j.issn:1671-1637.2007.01.012.

- [8] 张军辉, 黄晓明. 高速公路加宽工程加筋路堤离心模型试验及数值模拟[J]. 公路交通科技, 2011, 28(4): 1- (下转第46页)

- DANDAMUDI K, et al. Improving recycled asphalt using sustainable hybrid rejuvenators with enhanced intercalation into oxidized asphaltene nanoaggregates [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 262: 120090. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120090.
- [15] CELIA-SILVA L G, VILELA P B, MORGADO P, et al. Preaggregation of asphaltene in the presence of natural polymers by molecular dynamics simulation [J]. *Energy & Fuels*, 2020, 34(2): 1581-1591. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.9b03703.
- [16] 刘晋周, 张金生, 于斌, 等. 钢渣矿物组分与沥青黏附的分子模拟和试验研究 [J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2021, 51(6): 1009-1017. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2021.06.013.
- LIU Jinzhou, ZHANG Jinsheng, YU Bin, et al. Molecular simulation and experimental research on adhesion between mineral components of steel slag and asphalt [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2021, 51(6): 1009-1017. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2021.06.013.
- [17] MATOLIA S, GUDURU G, GOTTUMUKKALA B, et al. An investigation into the influence of aging and rejuvenation on surface free energy components and chemical composition of bitumen [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 245: 118378. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118378.
- (责任编辑:欧兆虎;校对:李脉;英文编辑:陈璐)

(上接第23页)

- 5, 11. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2011.04.001.
- ZHANG Junhui, HUANG Xiaoming. Centrifuge model tests and numerical simulation of geosynthetic-reinforced embankment for expressway widening [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2011, 28(4): 1-5, 11. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2011.04.001.
- [9] 曹杰, 郑建国, 张继文, 等. 不同边界条件下黄土高填方沉降离心模型试验 [J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2017, 15(4): 256-262. DOI: 10.13244/j.cnki.jiwhr.2017.04.003.
- CAO Jie, ZHENG Jianguo, ZHANG Jiwen, et al. Centrifuge model tests of loess high-filled settlement under different boundary conditions [J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2017, 15(4): 256-262. DOI: 10.13244/j.cnki.jiwhr.2017.04.003.
- [10] 浙江省交通运输厅. 高速公路改扩建设计细则: JTG/T L11—2014 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- Zhejiang Provincial Communication Department. Guidelines for design of expressway reconstruction and extension: JTG/T L11—2014 [S]. Beijing: China Communications Press, 2015.
- (责任编辑:罗容;校对:李脉;英文编辑:田湘)