

文章编号:1671-8879(2018)03-0018-08

泥质软岩弃渣及其改良填料路基沉降规律试验

杜耀辉^{1,2}, 杨晓华¹, 王明皎¹

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 甘肃长达路业有限责任公司, 甘肃 兰州 730000)

摘 要:为了研究泥质软岩弃渣在路基填料中的应用,以成武(成县—武都)高速公路为工程依托,开展土工离心模型试验,对泥质软岩及 3 种改良填料路基沉降规律进行分析,研究泥质软岩弃渣及其改良填料路基 2 年内的沉降量、沉降速率和固结时间;并在依托工程试验段开展路基沉降监测,对砂砾改良后的泥质软岩弃渣填筑路基沉降规律进行研究。试验结果表明:泥质软岩弃渣直接填筑路基时的沉降最大,路基顶面中心线的沉降量为 53.58 mm,路基边缘的沉降量为 49.25 mm;与泥质软岩弃渣直接填筑路基相比,砂砾改良后的泥质软岩弃渣填料路基沉降量最小,路基顶面中心线的沉降量减小了 34.7%,路基边缘的沉降量减小了 33%;泥质软岩弃渣直接填筑的路基沉降速率最大,为 0.5 mm/d,砂砾改良后的泥质软岩弃渣填料路基沉降速率最小,为 0.2 mm/d,比泥质软岩弃渣直接填筑路基时的沉降速率减小 60%;4 种方案固结时间由长到短依次为泥质软岩弃渣、土工格室加固、水泥改良、砂砾改良;试验段砂砾改良后的泥质软岩弃渣填筑路基沉降也呈现出路基顶面中心处较大,两侧沉降量较小的特征,前 30 d 路基顶面沉降的速率最大,144 d 后路基顶面最大沉降量达到 27.1 mm;靠近边坡端的沉降量比靠近挡土墙端的大;沉降监测结果与试验结果基本吻合,研究结果可为类似工程提供借鉴。

关键词:道路工程;泥质软岩;离心模型试验;沉降规律;现场监测

中图分类号:U416.1

文献标志码:A

Experimental on settlement of subgrade filled by improved argillaceous soft rock

DU Yao-hui^{1,2}, YANG Xiao-hua¹, WANG Ming-jiao¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. Gansu Changda Highway Co., Ltd., Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: To study the application of argillaceous soft rock discard in subgrade filling, considering the Chengwu (Chengxian to Wudu) Expressway as the engineering background, the settlement law of argillaceous soft rock and three kinds of modified fillers were analyzed using a centrifugal modeling test. Furthermore, the settlement, the settlement rate, and the two-year consolidation time of four kinds of waste slag fillers were investigated. The settlement monitoring of the subgrade was presented in the test section of the project, and the settlement law of the subgrade of the mud soft rock slag after improvements by gravel, was studied. The results show that the settlement of subgrade filled by argillaceous soft rock is the largest. Moreover, the

收稿日期:2017-11-09

基金项目:国家自然科学基金项目(41272285)

作者简介:杜耀辉(1981-),男,甘肃榆中人,甘肃长达路业有限责任公司高级工程师,长安大学工学博士研究生,E-mail:360489245@qq.com。

settlement of the top surface of the embankment center line is 53.58 mm, the edge of the subgrade is 49.25 mm, whereas embankment filling with gravel treatment has a minimum settlement, the settlement of the top surface of the embankment center line is 35 mm, which decreased by 34.7%, and the settlement of the edge of the subgrade is 33 mm, which decreased by 33%. The subgrade filled by argillaceous soft rock has a maximum settlement rate, up to 0.5 mm/d, however, the settlement rate of the filling with gravel treatment is minimum, with 0.2 mm/d. The order of the sequence of decreasing consolidation times is argillaceous soft rock, reinforced with geocell, cement treatment, and gravel treatment. The settlement of roadbed filled with argillaceous soft rock presents the characteristics of a larger center at the top of the foundation and a smaller settlement on both sides, the settlement rate of the top of the subgrade before 30 d is the maximum, and the maximum settlement after 144 d reaches 27.1 mm. Due to the difference between the retaining wall and subgrade slope, the settlement near the end of the slope is larger than that near the retaining wall. The settlement law of the observation points is similar, which is also in good agreement with the test results. The research results can provide a reference for similar projects. 2 tabs, 13 figs, 27 refs.

Key words: road engineering; argillaceous soft rock; centrifugal model test; settlement law; in-situ monitoring

0 引言

随着中国西部大开发的不断深入以及路网的逐渐完善,西部山区修筑的隧道也越来越多,为了保护沿线的生态环境,隧道施工弃渣处理是亟需解决的难题。山区高速公路修筑路基的填料就地取材较为困难,代价也较高。若将隧道弃渣应用到路基填料中,不仅能解决出渣场地问题,还可缩减工程成本,具有明显的经济和社会效益^[1-5]。

国内外学者对弃渣的工程特点及弃渣填筑路基的变形规律进行了大量研究。日本从20世纪60年代开始就对软岩填筑路基的可行性开展了试验研究。张莎莎等针对泥质软岩土石混合料弃渣的路基填料,开展了膨胀率试验及大型固结试验,通过对现场不同路基填筑工艺的试验和数值模拟研究,得到了试样的性质、适宜的松铺厚度和压实度^[2-3];曹宏波结合十天(十堰—天水)高速公路沿线挖方段工程,通过大型压缩试验研究了变质软岩弃渣的压缩特性^[4];张延杰等分析了水泥改良千枚岩弃渣用作铁路路基填料的适用性^[5];王东耀等针对弃渣料的岩性、颗粒组成、含水量等的变异性,系统研究了其路用性能^[6];曹周阳以秦巴山区高速公路路基加固工程为依托,通过室内大型压缩试验,研究了不同荷载下变质软岩填料的湿化应变及相应填高荷载下的湿化沉降^[7];赵明阶等开展了典型断面形式的离心模型试验,研究了不同组成、不同高度的岩堆体沉降

变形规律^[8];郝刚立等研究泥岩含量对路基强度指标的影响,并采用16、18 t压路机对不同泥岩含量的昔格达土填料进行压实试验^[9];刘杰等采用路基横向引孔加气泡混合轻质土换填的方法对路基进行处置,对比分析了软土处置前后的沉降速率和沉降量^[10];董云等通过不同含水率、压实度和颗粒组成的土石混填路基离心模型试验,揭示了土石混填路基的沉降变形特性^[11];曹豪荣等开展了红黏土及其石灰改性土的强度和变形特性对比试验,采用2种与实际工况接近的典型干湿路径,研究了石灰改性红黏土的路用性能,得到了不同干湿循环作用下石灰改性土的强度和变形参数变化规律^[12];王智超在流变试验的基础上,建立了分数阶微积分本构模型,得到了高填方路堤流变沉降的简化计算公式^[13];Leshchinsky等采用试验方法,研究了土工格室对软土路基的加固效果及应用^[14-16];Huang采用数值模拟方法研究了土工格栅改善软土路基的可行性与适用性^[17]。上述学者均对软岩弃渣在路基填料中的应用进行了研究,可知,软岩弃渣由于其工程性质较差,在应用于路基填料时通常需要对其性能进行改良^[18]。但不同改良填料对软岩路基的改良效果差异较大,而目前关于不同改良填料路基的对比研究还相对较少。

基于此,本文以成武(成县—武都)高速公路路基填料工程为依托,开展离心模型试验,对泥质软岩弃渣填料的路基沉降特征进行分析,与3种改良填

料路基的沉降规律进行对比,比选出最佳改良方案,并选择典型试验路段对砂砾改良后的泥质软岩弃渣路基沉降进行现场监测试验验证,以期为类似工程提供借鉴。

1 离心模型试验原理

土工离心模型试验的基本原理是将由原型材料按一定相似比 n 制成的模型,置于由离心机生成的高离心力场中,通过加大模型土体或岩体的自重体积力,使模型的应力状态与水平达到与原型相同的应力状态与水平,并显示出与原型相似的变形和破坏过程^[19-23]。本文以相似第二定理(π 定理)为试验的理论基础,采用量纲分析法推导试验模型的相似比,离心试验中的相似比如表 1 所示。

表 1 离心模型试验中的相似比

Tab. 1 Similar scale of centrifugal model test					
模拟物理量	原型	离心模型	模拟物理量	原型	离心模型
几何尺寸	1	$1/n$	重度	1	n
沉降	1	$1/n$	弹性模量	1	1
应力	1	1	时间	1	$1/n^2$
面积	1	$1/n^2$	体积	1	$1/n^3$

2 土样性质及模型材料

2.1 土样基本工程性质

试验土样采用成武高速公路隧址区的泥质软岩,根据标准重型击实试验得出泥质软岩的最大干密度为 2.2 g/cm^3 ,对应的最佳含水率为 6.8% 。地基土和填土的基本物理力学性质指标见表 2。

表 2 土样的物理力学性质指标

Tab. 2 Physical and mechanical indexes of foundation soil samples							
土样	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	黏聚力 C/kPa	内摩擦 角 $\varphi(^{\circ})$	泊松 比 μ	压缩模量 E_s/MPa	体积模量 K/MPa	剪切模量 G/MPa
地基	1.80	11.3	20.0	0.35	3.9	2.70	0.90
路堤	1.69	0.9	18.0	0.30	5.4	3.34	1.54

2.2 相似材料

(1)路基填料

采用取自甘肃省成县至武都高速公路现场的泥质软岩弃渣和砂砾作为试验的路堤填料。采用泥质软岩弃渣加 20%粗砂来模拟路堤下部的实际地基,在掺配砂砾时,剔除粒径大于 20 mm 的颗粒,水泥采用普通的硅酸盐水泥。

(2)加固筋材

对于加固筋材,离心模型试验中可通过控制方程或量纲分析法推导其相似方程

$$\frac{E_m t_m}{E_p t_p} = \frac{1}{n}$$

(1)

式中: E_p 为原型筋材的弹性模量; E_m 为模型材料的弹性模量; t_p 为原型筋材厚度; t_m 为模型材料厚度;本试验中模型相似比 n 取 50。

结合模型相似比、制样的难易程度、材料性能等因素综合对比,选取土工膜作为加固筋材,模拟土工格室加固。而实际工程中土工格室的规格一般是高度为 200 mm,焊距为 800 mm,长度根据工程实际来调整。本试验中选取的土工膜厚度为 1 mm,焊距为 16 mm,高度为 4 mm,如图 1 所示。

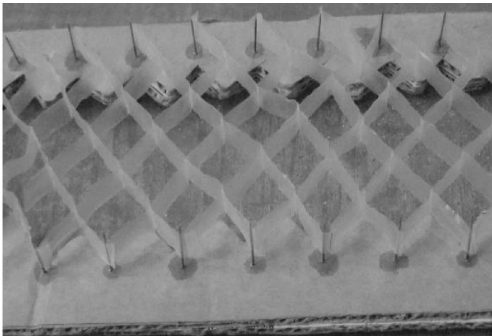


图 1 土工格室模拟材料
Fig. 1 Geocell simulation material

3 模型试验设计

3.1 试验装置

本试验所用离心机型号为 TLJ-3,如图 2 所示。最大荷载容量 $60\text{ g} \cdot \text{t}$,有效半径 2.0 m,最大加速度 200 g ;选用的模型箱长 0.7 m、宽 0.36 m、高 0.5 m。



图 2 TLJ-3 土工离心机
Fig. 2 TLJ-3 geotechnical centrifuge

3.2 试验量测元件

为了准确测得试验过程中路基的沉降规律,本试验采用德国生产的高精度激光位移传感器监测路基填料沉降。传感器架设在路基模型的中心线和边坡处,如图 3 所示。

3.3 模型尺寸设计

选取成武高速公路试验段作为离心模型试验原

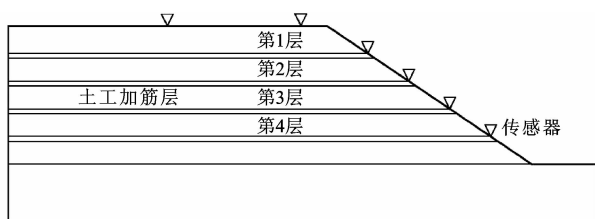


图3 传感器布置示意

Fig. 3 Schematic of sensor

型,道路路基面宽 28 m,双向四车道,路堤垂直厚度为 6 m,路堤底宽约为 46 m,边坡坡度 1:1.5。原型尺寸如图 4 所示。

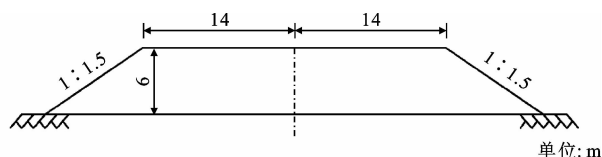


图4 道路路基原型

Fig. 4 Prototype of subgrade

由图 4 可知,道路路基是几何对称的,因此试验模型设置为原型的一半断面,同时假设地基为水平地基,取相似比 $n=50$,边坡坡度 1:1.5,试验模型布置如图 5 所示^[20]。

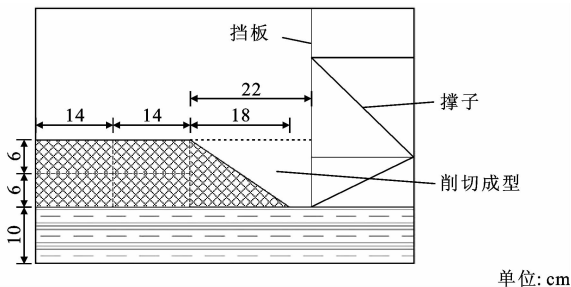


图5 路基离心模型

Fig. 5 Centrifugal model of subgrade

3.4 试验过程

3.4.1 试验方案

离心模型结构分为 2 个部分:上层是 12 cm 厚的泥质软岩弃渣改良层,下层是夯实后的水平地基。离心模型试验方案分为 4 组依次进行,并对比不同改良方式对路堤沉降产生的效果:

工况 1,直接采用泥质软岩弃渣填筑路基;

工况 2,用加筋材料土工格室对软岩弃渣进行加固;

工况 3,掺配砂砾对泥质软岩弃渣进行改良,泥质软岩弃渣和砂砾配合比为 5:5;

工况 4,掺配水泥对泥质软岩弃渣进行改良,其水泥的掺加剂量(质量分数,下同)为 3%。

使用土工格室加固路基时,试验路基采用从下

到上先填 2 层泥质软岩弃渣(每层 1 cm 厚),再覆盖 1 层土工格室加筋层(0.4 cm 厚),总共 5 个循环,工况 2 试验模型填筑示意如图 6 所示。

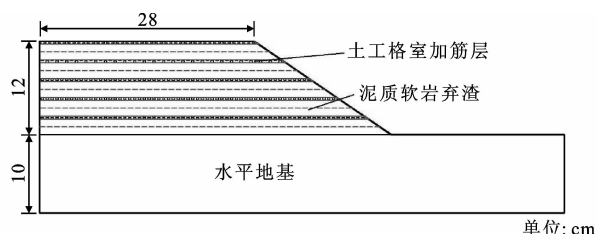


图6 工况2试验模型填筑示意

Fig. 6 Schematic of testing model of case 2

3.4.2 模型制作与试验步骤

模型试验的路堤填料经过现场取土、晒干、粉碎、过筛,最后湿喷加水制作而成,并根据试验所得的最佳含水率和最大干密度,计算确定 4 种方案地基和路堤填料的土石配合比及其用量,模型制作过程如图 7 所示。

(1)首先在模型箱底铺设 10 cm 水平地基,由掺加 20%粗砂的泥质软岩弃渣填筑而成,同时,根据室内试验含水率和压实系数现场实测值确定填料用量,分层填筑地基并击实。

(2)路堤填筑之前,在距离模型箱壁左侧 50 cm 处固定一厚木挡板,如图 5 所示。再依次分 4 层均匀填筑路堤,每层 3 cm。

(3)路堤填筑完毕后,在其顶层表面用环刀取样,测其密度和含水率,然后再回填取样位置。同时,按 1:1.5 的坡度对路堤右侧进行切削成型。

(4)将用于观测的有机玻璃板安装好之后,用喷头对土样模型进行喷水模拟降雨,喷水量为成武高速公路施工现场的年平均降雨量,将模型箱吊入离心室并安装激光位移传感器。

(5)在离心机上以 50g 的加速度连续运行 420 min,模拟实际工程中路基约 2 年的固结,沉降量由位移传感器自动采集和保存。

(6)离心机运行结束后,取出模型箱,并将模型土样从模型箱逐层移除,分别测量路堤土层含水率及重度^[24-25]。

4 试验结果与分析

本文重点研究不同填筑路基 2 年内的沉降量、沉降速率、固结时间,以获得最佳的改良方案。不同方案下路基沉降对比结果见图 8、图 9,图中所测数据均为换算后的沉降值(n 倍的试验值)^[24-25]。由图 8、图 9 可知:

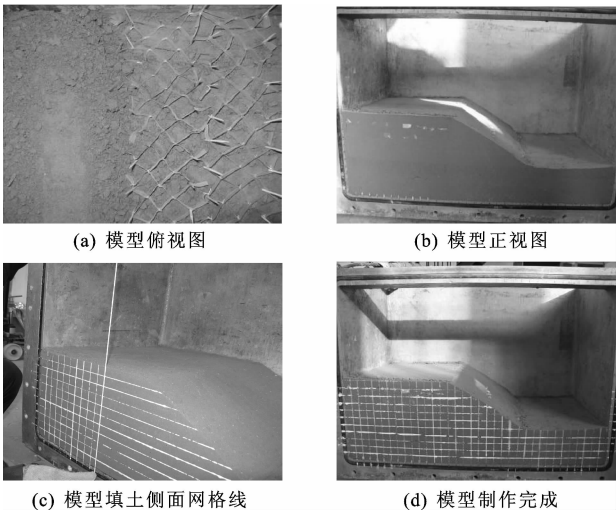


图 7 模型制作过程
Fig. 7 Process of model making

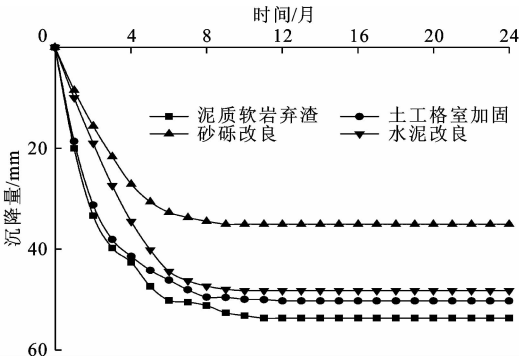


图 8 不同方案下路基顶面中心处沉降
Fig. 8 Settlement of subgrade center under different schemes

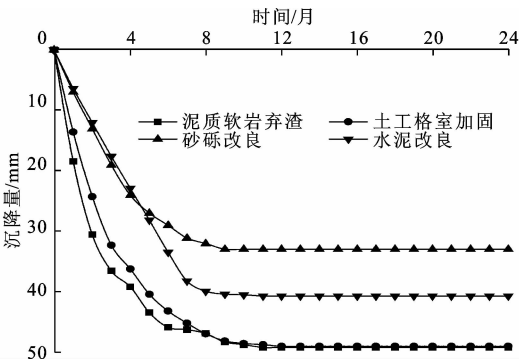


图 9 不同方案下路基边缘处沉降
Fig. 9 Settlement of subgrade edge under different schemes

(1) 4 种工况的路堤顶面中心线沉降量均比路基边缘的大,与新建公路路基横断面方向中间大两边小的沉降规律相吻合。4 种工况的累计沉降量从大到小依次为泥质软岩弃渣、土工格室加固、水泥改良、砂砾改良。泥质软岩弃渣直接填筑路基沉降量最大,其路堤顶面中心线的沉降量为 53.58 mm,路基边缘的沉降量为 49.25 mm,不均匀沉降度为

8%;砂砾改良的弃渣填料路基沉降量最小,与泥质软岩弃渣填筑路基相比,其路堤顶面中心线的沉降量减小了 34.7%,路基边缘的沉降量减小了 33%。

(2) 4 种工况的沉降速率均随时间的增长而逐渐降低,沉降可分为 4 个阶段:快速沉降阶段、均匀沉降阶段、沉降速率减小阶段、收敛稳定阶段。通过前两阶段发现,泥质软岩弃渣直接填筑路基沉降速率最大,为 0.5 mm/d,变形持续 2 个月。3 种改良后的填料路基沉降速率都有不同程度减小,用砂砾改良的弃渣填料路基沉降速率最小,为 0.2 mm/d,变形持续近 5 个月,沉降速率减小 60%。

(3) 路基填料的固结基本在 1 年内完成,随后其沉降量基本保持不变。4 种方案固结时间由长到短依次为泥质软岩弃渣直接填筑(12 月)、土工格室加固(12 个月)、水泥改良(11 个月)、砂砾改良(10 个月)。

5 现场监测试验

5.1 监测控制网布设

在试验路段范围内布设沉降监测控制网对路基进行现场沉降监测。以试验路段的国家二等精密高程控制测量基准点、水准点及一般水准点为基础,并根据国家二等水准测量的技术要求,在观测现场进一步加密水准基点,建立沉降观测控制网^[26]。

5.2 监测方案

试验路段位于成武高速公路四标 C 匝道,观测砂砾改良的泥质软岩弃渣填筑路基沉降规律。在桩号 00-120 段设置 2 个观测断面,分别在每个断面的路基基底和顶面埋设坡面沉降板,2 层沉降管垂直距离相隔 3 m,每层布置 11 个监测点,从路基挡墙至坡面测点的编号依次为测点 1~测点 11,用于观测剖面沉降管整体竖向位移,沉降观测使用测斜仪,型号为 NDA1511,如图 10 所示。

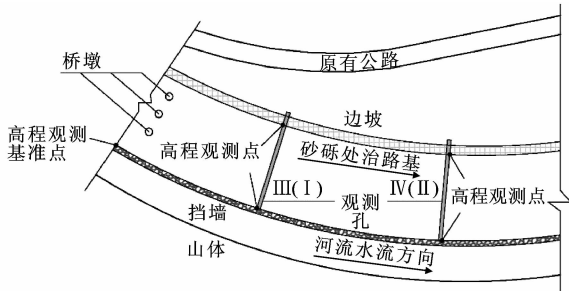


图 10 沉降管埋设平面图
Fig. 10 Planar graph of sediment-tubes buried

为了提高沉降观测的准确性,在埋设剖面沉降管时,通过测量放样的形式将沉降管分 2 批、上下层

间隔 3 m 进行埋设^[21],如图 11 所示。

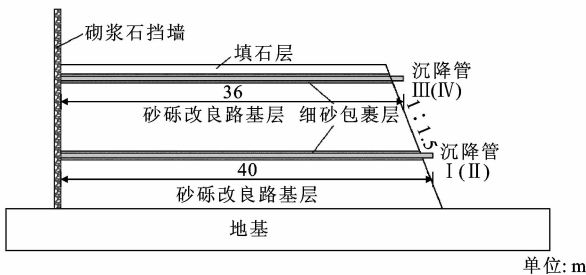


图 11 沉降管埋设断面
Fig. 11 Section of sediment-tubes buried

(1)首先埋设下层沉降管(I、II号),待下层路基层压实完成后,通过周边基准点,在指定位置铺设垫层,先用细砂铺设至其高程位置,再在其表面均匀撒一层细土填充细砂孔隙,并击实整平,使沉降管受力均匀;安放沉降管前,在沟槽内定点埋设螺丝,将沉降管用螺丝对接,并使沉降管轴线固定在水平位置;安装完成后,在其顶部铺设细土和细砂作为保护层,厚度为 20 cm。

(2)待下层路基层压实完成后,利用沟槽埋设上层沉降管(Ⅲ、Ⅳ号),开挖沟槽之前,通过周边基准点确定填方路堤坡面沉降管的里程位置,并按照宽度为 0.3 m、深度为 0.5 m 的空间开挖沟槽,开挖完成后将沟槽底部整平。安装工序与下层沉降管相同,安装完成后,用细土和细砂回填整平沟槽,并利用夯机将其压实,压实度不小于 96%。

5.3 观测数据及评估

现场监测工作在路基填筑并压实完成后立即进行,连续监测 5 个月。对现场监测得到的沉降数据进行整理,如图 12、图 13 所示。

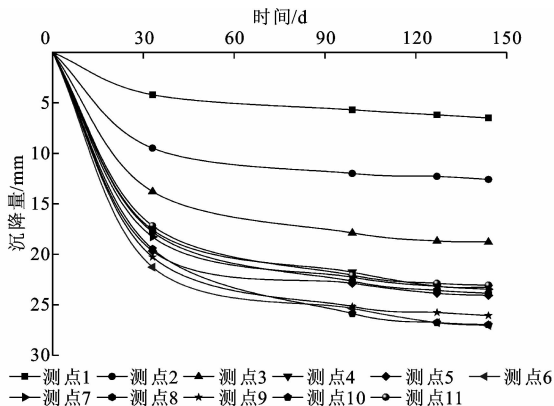


图 12 Ⅲ号管路基沉降量随时间变化
Fig. 12 Changes of subgrade settlement with time of tube III

由图 12 和图 13 可知,试验段路基沉降呈现出路基顶面中心处沉降量较大、两侧较小的特征,而且

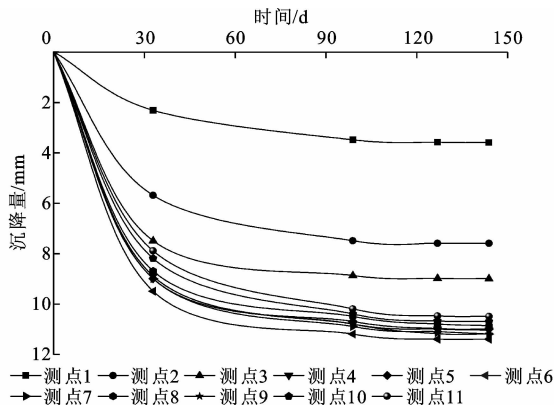


图 13 I号管路基沉降量随时间变化
Fig. 13 Changes of subgrade settlement with time of tube I
各测点的沉降速率同步变化,表明不同位置的填料固结过程是相同的。I号管位置的路基沉降量明显小于Ⅲ号管,但沉降规律基本相同,路基中心处沉降最大达 11.4 mm。

路基沉降随时间延长逐渐增大,前 30 d 路基沉降的速率最大,初始沉降完成之后沉降速率变缓,144 d 后路基顶面最大沉降量为 27.1 mm,路基下部最大沉降量为 11.4 mm。路基顶面中心处沉降量较大,路基顶面两侧沉降量较小,沉降管靠近边坡端 11 号测点的沉降量比靠近挡土墙端 1 号测点的大^[27]。

对比试验路监测结果和模型试验结果可知,模型试验中前 5 个月的沉降速率变化不大,而试验路实际监测中沉降速率有一个由快到慢的过渡,试验路前 5 个月总的沉降量基本相同。由于沉降速率变缓的时间早,监测的总沉降量可能小于模型试验的 35 mm,其固结时间则可能大于模型试验的 10 个月。

6 结 语

(1)从路堤顶面中心线的沉降量分析可知,2 年内 4 种方案沉降量从大到小依次为泥质软岩弃渣(53.58 mm)、土工格室加固(50.15 mm)、水泥改良(48.15 mm)、砂砾改良(35 mm);4 种方案固结时间由长到短依次为泥质软岩弃渣(12 月)、土工格室加固(12 个月)、水泥改良(11 个月)、砂砾改良(10 个月)。因此,砂砾改良方案是成武高速公路泥质软岩弃渣路基改良的首选方案,不仅有利于路基稳定,而且能够缩短工期。

(2)各方案的沉降速率均随时间的增长而逐渐减小,用砂砾改良弃渣填料路基的沉降速率最小,沉降速率比泥质软岩直接填筑路基时减小 60%。

(3)通过现场路基顶面沉降观测可知,成武高速公路四标采用泥质软岩弃渣填筑路基的沉降呈现出中心处沉降量较大,两侧沉降量较小的特征,各观测点沉降值变化规律基本一致,沉降速率呈现出同步变化特征,且与模型试验所得规律基本相吻合;路基沉降随时间逐渐增大,144 d 后路基顶面最大沉降量达到 27.1 mm。

(4)本文仅研究了土工格室加固、水泥改良及砂砾改良 3 种泥质软岩加固方案对路基沉降的影响,后续将会选取更多比选方案,综合分析各种改良填料的优缺点,使研究成果能更好的指导工程施工。

参考文献:

References:

- [1] 王明皎. 泥质软岩弃渣路用性能的研究[D]. 西安:长安大学,2013.
WANG Ming-jiao. Study on the road performance of argillaceous soft rock and slag[D]. Xi'an:Chang'an University,2013.
- [2] 张莎莎,杨晓华,王明皎,等. 泥质软岩土石混合料弃渣路用性能研究[J]. 公路交通科技,2015,32(2):55-59.
ZHANG Sha-sha, YANG Xiao-hua, WANG Ming-jiao, et al. Study on road performance of argillaceous soft rock earth mixture spoil[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2015,32(2):55-59.
- [3] 张莎莎,杨晓华,杜耀辉,等. 泥质软岩土石弃渣路基填筑工艺及质量检测方法[J]. 长安大学学报:自然科学版,2016,36(1):8-13.
ZHANG Sha-sha, YANG Xiao-hua, DU Yao-hui, et al. Roadbed construction process and quality inspection for argillaceous soft rock earth mixture spoil[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition,2016,36(1):8-13.
- [4] 曹宏波. 十天高速公路安康西段变质软岩填料压缩特性研究[D]. 西安:长安大学,2011.
CAO Hong-bo. Study on compaction characteristics of metamorphic rock filler of Shi-Tian Highway, western section of Ankang[D]. Xi'an:Chang'an University,2011.
- [5] 张延杰,王旭,尹亚雄,等. 水泥改良千枚岩弃渣用作铁路路基填料的试验研究[J]. 铁道学报,2014,36(6):81-86.
ZHANG Yan-jie, WANG Xu, YIN Ya-xiong, et al. Experimental study on railway subgrade filling material of phyllite spoil improved with cement[J]. Journal of the China Railway Society,2014,36(6):81-86.
- [6] 王东耀,刘丽萍,叶万军. 山渣料路用性能试验[J]. 长安大学学报:自然科学版,2007,27(1):15-18.
WANG Dong-yao, LIU Li-ping, YE Wan-jun. Road performance experiment of rock slag mixture[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition,2007,27(1):15-18.
- [7] 曹周阳. 秦巴山区变质软岩路堤填料路用性能及振动压实工艺研究[D]. 西安:长安大学,2013.
CAO Zhou-yang. Road engineering properties of metamorphic soft rock used as embankment filling in Qin-Ba Mountain Areas and vibration compaction technology research[D]. Xi'an:Chang'an University,2013.
- [8] 赵明阶,王昌贤,杨锡武,等. 公路岩堆路基沉降变形规律与施工控制深度研究[J]. 岩土工程学报,2010,32(1):33-40.
ZHAO Ming-jie, WANG Chang-xian, YANG Xi-wu, et al. Settlement deformation properties and construction control depth of rock heap subgrade in highway[J]. China Journal of Geotechnical Engineering,2010,32(1):33-40.
- [9] 郝刚立,王维早. 泥岩含量对昔格达土路基强度指标的影响[J]. 长安大学学报:自然科学版,2010,30(2):53-57.
HAO Gang-li, WANG Wei-zao. Effect of content of mud rock on intensity index of Xigeda filling in road subgrade[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition,2010,30(2):53-57.
- [10] 刘杰,毛爱民,宋亮,等. 气泡混合轻质土在调整高速公路不均匀沉降中的应用[J]. 工业建筑,2014,44(9):122-125.
LIU Jie, MAO Ai-min, SONG Liang, et al. Application of foam cement in regulating uneven settlement on express highway without blocked road[J]. Industrial Construction,2014,44(9):122-125.
- [11] 董云,柴贺军,阎宗岭. 土石混填路基沉降变形特征的离心模型试验研究[J]. 公路交通科技,2007,24(3):25-29.
DONG Yun, CHAI He-jun, YAN Zong-ling. Centrifugal model test study on the settlement character of the rock-soil filled roadbed[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2007,24(3):25-29.
- [12] 曹豪荣,李新明,樊友杰,等. 考虑干湿循环路径的石灰改性红黏土路用性能试验研究[J]. 岩土力学,2012,33(9):2619-2624.
CAO Hao-rong, LI Xin-ming, FAN You-jie, et al. Experimental study of pavement performances of lime treated laterite soil considering drying-wetting cycle

- paths[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(9): 2619-2624.
- [13] 王智超. 高填方路堤流变沉降本构模型及其计算方法研究[D]. 湘潭:湘潭大学, 2011.
WANG Zhi-chao. Research on constitutive model and its calculation method of high-filled embankment rheological settlement[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2011.
- [14] LESHCHINSKY B, LING H. Effects of geocell confinement on strength and deformation behavior of gravel[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013, 139(2): 340-352.
- [15] SHARMA J S, BOLTON M D. Centrifuge modelling of an embankment on soft clay reinforced with a geogrid[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 1996, 14(1): 1-17.
- [16] TANYU B F, AYDILEK A H, LAU A W, et al. Laboratory evaluation of geocell-reinforced gravel subbase over poor subgrades[J]. *Geosynthetics International*, 2013, 20(2): 47-61.
- [17] HUANG W C. Improvement evaluation of subgrade layer under geogrid-reinforced aggregate layer by finite element method[J]. *International Journal of Civil Engineering*, 2014, 12(3): 392-403.
- [18] COWLAND J W, WONG S C K. Performance of a road embankment on soft clay supported on a geocell mattress foundation[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 1993, 12(8): 687-705.
- [19] 周健, 李翠娜, 黄金, 等. 扶壁式加筋复合挡墙变形规律和受力机理[J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2015, 43(4): 529-535.
ZHOU Jian, LI Cui-na, HUANG Jin, et al. The deformation of law and stress mechanism of wrapped-reinforced and counterfort combined retaining wall[J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2015, 43(4): 529-535.
- [20] 傅珍, 王选仓, 李宏志, 等. 高速公路拓宽路基差异沉降[J]. *交通运输工程学报*, 2010, 10(6): 25-31.
FU Zhen, WANG Xuan-cang, LI Hong-zhi, et al. Differential settlement of widening subgrade for expressway[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2010, 10(6): 25-31.
- [21] 刘玉良, 阳恩慧, 蒋鑫, 等. 斜坡路基压力注浆改良离心模型试验研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2015, 11(2): 299-305.
- LIU Yu-liang, YANG En-hui, JIANG Xin, et al. Research about the centrifugal model test of pressure grouting solution for the sloped embankment[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2015, 11(2): 299-305.
- [22] 宋登艳. 灌溉诱发型黄土滑坡离心模型实验和数值分析[D]. 西安:长安大学, 2014.
SONG Deng-yan. The centrifuge modeling test and numerical analysis of irrigation-induced loess landslide[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- [23] 肖成志, 刘贺, 王荣霞, 等. 土工格栅加筋土柔性桥台结构性能的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(4): 767-772.
XIAO Cheng-zhi, LIU He, WANG Rong-xia, et al. Experimental study on performance of GRS bridge abutment with flexible face[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(4): 767-772.
- [24] 陈虎, 罗强, 张良, 等. 基于离心模型试验的路堤地基差异沉降传递规律及控制限值研究[J]. *铁道学报*, 2013, 35(13): 71-77.
CHEN Hu, LUO Qiang, ZHANG Liang, et al. Study on transfer behavior and control limit value of differential settlements of embankment foundation bases on centrifugal model test[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2013, 35(13): 71-77.
- [25] 金生吉. 高填方多级挡土墙路基沉降规律与稳定性数值模拟研究[D]. 沈阳:东北大学, 2009.
JIN Sheng-ji. Study of subgrade settlement laws of high fill multistage retaining wall and numerical simulation about stability[D]. Shenyang: Northeastern University, 2009.
- [26] 蒋关鲁, 房立凤, 张俊兵, 等. 客运专线水泥改良黄土路基填料填筑试验研究[J]. *中国铁道科学*, 2009, 30(1): 1-7.
JIANG Guan-lu, FANG Li-feng, ZHANG Jun-bing, et al. Test study on cement improved loess as the filling material for subgrade construction of passenger dedicated line[J]. *China Railway Science*, 2009, 30(1): 1-7.
- [27] 刘升传, 曹渊. 新建铁路软土路基沉降规律研究[J]. *铁道工程学报*, 2010(5): 1-3, 8.
LIU Sheng-chuan, CAO Yuan. Research on settlement law of soft soil subgrade of new railway[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2010(5): 1-3, 8.