

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.03.003

# 浸水粉土路基竖向稳定性模型试验研究

管延华<sup>1,2</sup>, 庄培芝<sup>1,2</sup>, 李红超<sup>3</sup>, 赵志钦<sup>1</sup>

(1. 山东大学 土建与水利学院, 济南 250061; 2. 山东省路基安全工程技术研究中心, 济南 250061;  
3. 河南省地矿局第三地质勘察院, 河南 洛阳 471023)

**摘要:**针对黄河冲积平原区低矮粉土浸水路基进行足尺模型试验研究, 主要研究了不同浸水条件下, 粉土路基在分级循环荷载作用下的受力、竖向变形特性。研究证明: 黄泛区粉土路基具有强烈的毛细现象和水敏特性; 新建及浸水粉土路基中路床区附加应力值较大, 后沿深度急剧减小; 浸水路基强度衰减现象明显, 超载作用下, 弹、塑性变形显著, 且变形值随着浸水水位的上升而不断增大; 路基塑性变形易在饱水区积聚发生, 该区域在低应力水平下亦会产生较大的塑性变形。

**关键词:**粉土路基; 强度衰减; 模型试验; 弹性变形; 塑性变形

**中图分类号:** TU458 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2013)03-0012-06

## Model Test of Vertical Stability of Silt Subgrade after Soaking

Guan Yanhua<sup>1,2</sup>, Zhuang Peizhi<sup>1,2</sup>, Li Hongchao<sup>3</sup>, Zhao Zhiqin<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, P. R. China;  
2. Shandong Engineering & Technology Research Center for Subgrade Safety, Jinan 250061, P. R. China;  
3. The Third Geological Survey Institute, Bureau of Geology and Mineral Resources of Henan Province, Luoyang 471023, Henan, P. R. China)

**Abstract:** A full-scale model test was conducted on the low silt soaking subgrade of the alluvial flatlands flooded by the Yellow River. The test mainly studied the mechanical characteristics and vertical deformation of the silt subgrade under grade cyclic loading in different water immersion conditions. The test demonstrates that the silt subgrade has intense capillarity and water sensitive characteristics; the additional stress is large in the roadbed of the new and soaking silt subgrade, and it decreases sharply as the depth increases; the phenomenon of strength degradation is obvious in the soaking subgrade; the elastic and plastic deformation is large under overloading force and the deformation increases as the water immersion level ascending; The plastic deformation of the subgrade is easy to accumulate in water-saturated areas, where large plastic deformation still occurs in low stress level.

**Key words:** silt subgrade; strength degradation; model test; plastic deformation; elastic deformation

黄泛区受筑路材料限制, 常采用粉土作为路基填料。由于粉土具有渗透系数较大、毛细作用强烈等特征, 所填筑路基易受外界水(地表水入渗、毛细水上升等)影响, 致使路基含水率普遍高于 20%, 甚至局部区域达到饱和状态, 造成路基支撑强度严重不足, 行车荷载反复作用下, 路基产生过量的残余变形, 并逐步反映到路面, 影响路面结构的使用性能和使用寿命<sup>[1-3]</sup>。

路基是路面结构的支撑体, 车轮荷载通过路面

结构传至路基, 路基土的应力-应变特性对路基路面结构的整体强度和刚度有很大影响<sup>[4]</sup>。研究表明, 行车荷载作用下湿软路基的残余累积变形是低路堤路段的主要工程病害, 而竖向附加应力是引起路基残余变形的一个主要原因<sup>[5]</sup>。随着道路交通量和载重量的增加, 道路病害日益严重。现阶段对于粉土路基受力变形特性的研究主要集中在基本性质探讨<sup>[6-8]</sup>和经验计算分析<sup>[9-14]</sup>方面, 对其整体工作性状

收稿日期: 2012-09-21

基金项目: 山东大学自主创新基金(2012ZD032)

作者简介: 管延华(1969-), 男, 博士, 主要从事桥梁工程研究, (E-mail) guanyanhua@sdu.edu.cn.

缺乏研究。因此,有必要对浸水粉土路基的竖向变形规律进行足尺模型试验研究,为路基设计和加固提供依据。文献[15]针对黄泛区常见低矮粉土路基进行了模型试验研究,分析了强度衰减路基的稳定特性,但是对荷载作用下浸水粉土路基的竖向变形机理缺乏较深入的分析。

## 1 试验方案设计

### 1.1 试验路基材料

模型路基填料采用山东省黄河冲积平原的粉土,土的颗粒组成与物性指标见表1、表2。

表1 试验填土的颗粒组成

| 粒径/mm       | 百分含量/% | 粒径/mm       | 百分含量/% |
|-------------|--------|-------------|--------|
| >0.500      | 0      | 0.050~0.010 | 32.9   |
| 0.500~0.250 | 0      | 0.010~0.005 | 2.0    |
| 0.250~0.074 | 26.5   | 0.002~0.005 | 4.3    |
| 0.074~0.050 | 34.2   | <0.002      | 0.1    |

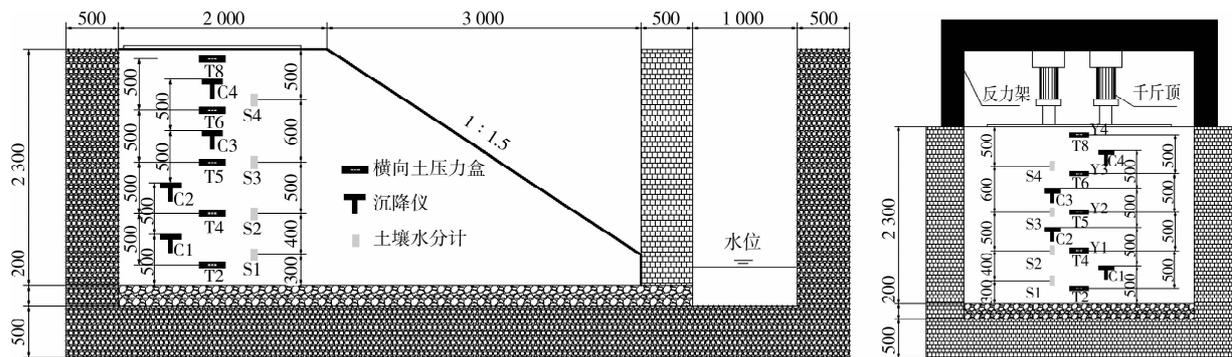


图1 试验模型及仪器设备布设示意图

### 1.3 试验工况设计

文献[1]中的研究表明:黄泛区粉土路基在运营初期基本处于最佳含水量状态;路基长期运营后,由于降雨和地下毛细水上升等因素的影响,路基含水量增大,路基强度衰减,并且路基变形增大。通过对现场病害路段的路基含水量测定,运营路基含水量通常在20%~30%。据此试验方案设计针对3种不同浸水水位的路基进行加载试验,测试、对比分析其受力、变形特征。

路基模型分12层进行填筑,第1层为碎石垫层,厚度为20 cm,夯实整平后铺一层透水土工布。粉土路基填筑时严格按照路基设计规范规定的压实度进行质量控制。其中:工况1为直接在新建路基上进行加载、量测;工况2在灌水井中保持20 cm高的水位,即水位与碎石垫层顶面平齐,然后进行加载和数据采集;工况3在灌水井中保持50 cm高的水

表2 试验填土的物性指标

| 液限/<br>% | 塑限/<br>% | 塑性<br>指数 | 比重  | 最大干密度<br>$\gamma_d / (g \cdot cm^{-3})$ | 最优含水率<br>$\omega_{op} / \%$ | 定名          |
|----------|----------|----------|-----|---|-----------------------------|-------------|
| 29.9     | 19.1     | 10.8     | 2.7 | 1.69                                    | 15.4                        | 含砂低液<br>限粉土 |

### 1.2 试验模型及监测内容

根据路基条状构造特性,在室内实验槽中填筑高度2.5 m、顶面宽度2 m、纵向长度3 m、边坡坡度为1:1.5的半幅粉土路基模型。模型路基底部铺设20 cm碎石,碎石层与竖向水井联通,通过竖向水井水位的变化,模拟实际路基地下水位的升降,以实现模型路基含水量的变化,如图1所示。

使用百分表和分层沉降仪监测路基顶面和不同深度土体竖向变形;利用土壤水分计并结合钻孔取样测量模型路基不同深度土层的含水量;通过在土体内埋设土压力盒测量土体内部竖向应力分布。

位,路基浸水后进行加载和数据采集。

表3 试验方案

| 试验方案 | 工况 | 潜水位高度/cm |
|------|----|----------|
| 新建路基 | 1  |          |
| 浸水路基 | 2  | 20       |
| 浸水路基 | 3  | 50       |

### 1.4 加载设计

基于车辆荷载通过路面结构层扩散后均匀分布于路基顶面的假定,模型路基顶部加载采用矩形均布荷载形式。为明确标准车辆荷载及不同超载交通对路基竖向变形的影响,模型试验共选取4个不同荷载等级依次进行单循环加载;同时,为增加试验过程的可控性和可操作性,各控制荷载均按5次进行分级施加,如表4所示。试验采用液压千斤顶通过反力架将荷载施加到路基顶部的加载板上,荷载大小采用测力

计分级控制。加载板尺寸为 2.4 m×1.7 m。加载装置如如图 2 所示,试验加载分级情况如表 4 所示。



图 2 试验加载装置

表 4 试验加载分级

| 荷载等级 1 |     | 荷载等级 2 |     | 荷载等级 3 |     | 荷载等级 4 |     |
|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|
| 荷载     | 分级  | 荷载     | 分级  | 荷载     | 分级  | 荷载     | 分级  |
|        | 0   | 0      |     | 0      |     | 0      |     |
|        | 20  | 28     |     | 36     |     | 44     |     |
| 100    | 40  | 56     | 140 | 72     | 180 | 88     | 220 |
|        | 60  | 84     |     | 108    |     | 132    |     |
|        | 80  | 112    |     | 144    |     | 176    |     |
|        | 100 | 140    |     | 180    |     | 220    |     |

## 2 试验结果及分析

### 2.1 路基含水率分布

据测试路基内部毛细水上升及含水率分布如图

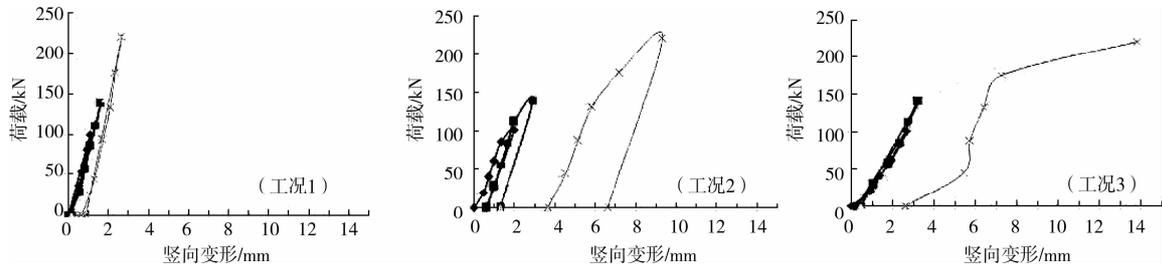


图 3 模型路基内部含水率分布图

### 2.2 荷载-变形历程曲线

3 种工况分别进行 4 次循环加载,每次循环间隔时间为 24 h;其中每一循环分为 5 级加载,每级间隔时间为 30 min。每次循环加载前、每级荷载加载后及每次循环卸载后均进行测试读数。可得路基顶面竖向变形的荷载历程曲线如图 4 所示。

分析图 4 可知,工况 1 路基的竖向变形以弹性变形为主,塑性变形很小。随浸水水位的升高,路基

内部含水量增加,其塑性变形明显增大。工况 2 累计塑性变形是工况 1 的 7 倍左右;随着竖向水位的提高,路基的含水量的增大,路基强度进一步衰减,工况 3 在最后一级荷载作用下,其竖向位移呈不稳定增大趋势,说明路基基本到达塑性破坏状态。

另外,根据路基模型 3 个工况分级加卸载竖向位移变形曲线,可得到模型路基总体刚度  $K$  的变化。工况 1 模型路基的总体刚度  $K_1$  为 93,工况 2 的  $K_2$  为 47,总体刚度为工况 1 的 51%;工况 3 的  $K_3$  为 36,总体刚度仅为工况 1 的 39%。可见,随浸水水位的提高,路基内部含水量增加,路基抵抗竖向变形的能力不断降低。

### 2.3 各级荷载作用下路基内部应力分布

路基承受荷载分为内部荷载(自重)和外部荷载

(路面结构重及行车荷载)。路基填筑完成后,自重引起的变形绝大部分已完成,剩余的蠕变变形可忽略不计,计算时只需考虑外部荷载引起的变形<sup>[4]</sup>。因此,主要对加载时路基内部的附加应力进行分析。3 种工况各级荷载作用下监测数据如图 5 所示。

分析图 5 可知:3 种工况荷载作用下路基内部竖向附加应力主要集中在 0~1.5 m 范围内,即路床区最大,路床以外迅速减小,路床区内部附加应力是下路堤的 2~4 倍;随着荷载的增加,路基内部竖向附加应力沿深度的增大速率不同,路基上部增大的速率快,下部增大的速率慢;随浸水水位的提高,路基内部含水量越大,路基内部附加应力曲线与路基 0.2 倍自重应力线偏离越远,即荷载对路基的影响深度越大。

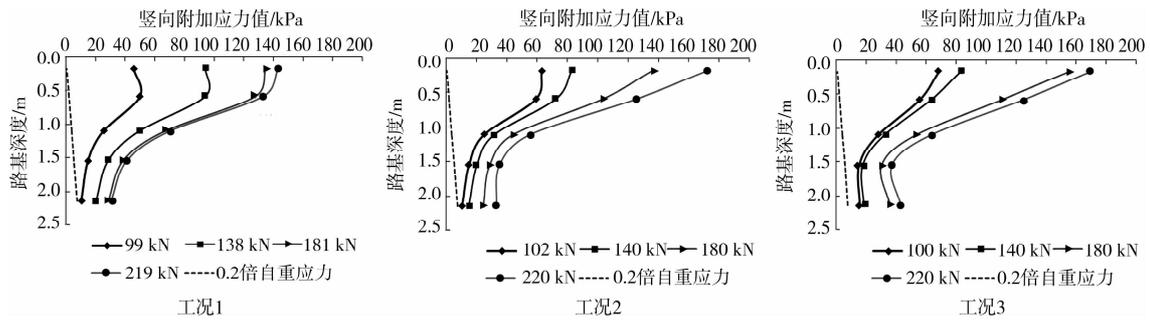


图5 不同工况下路基内部附加应力分布图

#### 2.4 各级荷载作用下路基分层平均应变

道路结构总变形中,路基变形占很大部分,约占70%~95%<sup>[4]</sup>。路基土的变形包括弹性变形和塑性变形2部分。过大的塑性变形易导致沥青路面的不均匀变形和水泥混凝土路面的板块断裂。弹性变形过大易使得沥青面层和水泥混凝土面板产生疲劳开裂。因此应加强对路基弹、塑性变形的监测、分析。根据路基顶面百分表测量得到的总竖向弹、塑性变

形及路基内部并联式埋置的电感式单点沉降计(型号YT-DG-0105A,分辨率0.01 mm)测量获得的路基不同深度的各竖向弹、塑性变形,计算各层土体的竖向弹、塑性位移,并通过不同深度的各层土体的竖向变形与该土层厚度的比值作为该深度处土层的平均应变,据此整理3种工况路基在荷载作用下的模型路基分层平均弹性应变和平均塑性应变情况,如图6、图7所示。

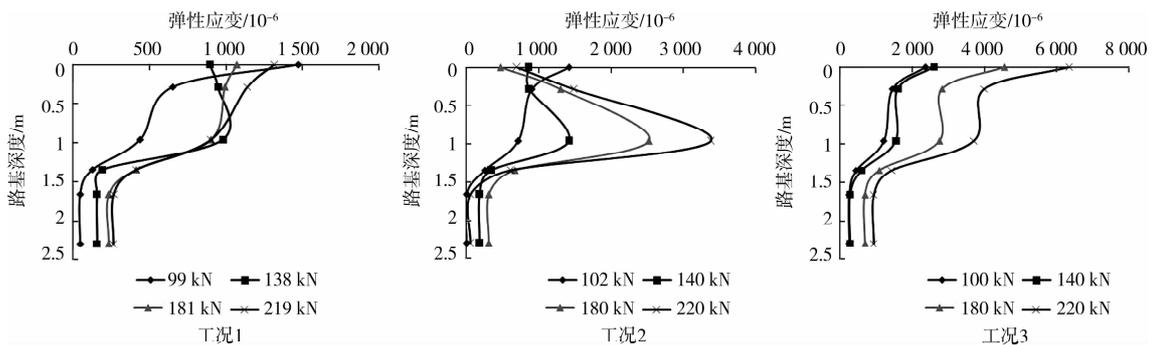


图6 不同工况下路基内部弹性平均应变图

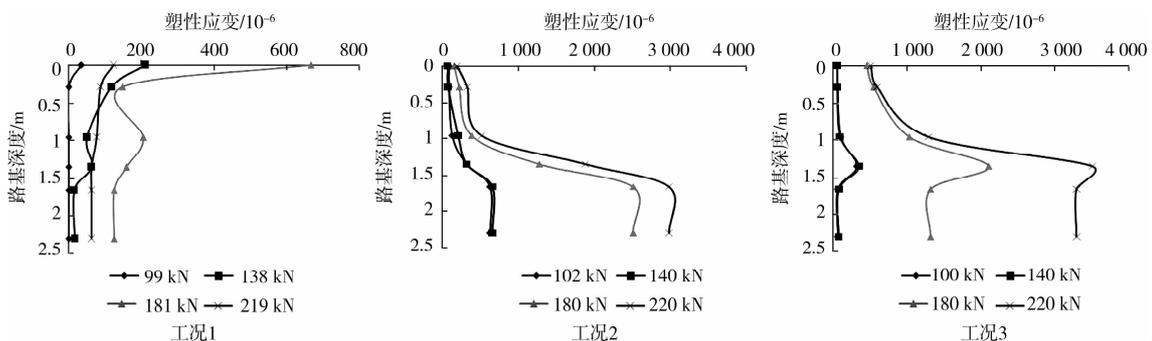


图7 不同工况下路基内部塑性平均应变图

由图6可知:3种工况的弹性变形主要集中在路基上部0~1.5m范围内,路基深度1.5m以下,弹性变形均急剧减小。图7表明:工况1,新建粉土路基各级荷载作用下上部0~0.5m范围塑性变形相对较大;工况2,由于路基浸水和毛细水作用,路基底部含水量增大,荷载作用下路基下部1.5~

2.5m范围发生较大的塑性变形,随浸水水位提高,毛细水继续上升;工况3,路基底部塑性变形范围自下而上继续扩大,致使路基下部1.0~2.5m范围塑性变形较大。可见,路基塑性变形易在饱水区积聚发生,该区域在低附加应力水平下亦会产生较大的塑性变形。

## 2.5 超载浸水路基的变形特征分析

规范规定<sup>[16]</sup>公路车辆荷载如图 8 所示。假定路面结构层厚度取 70 cm,取应力扩散角为 45°,根据试验加载分级计算超载情况如表 5 所示。各级荷载作用下,模型路基各工况弹性变形和塑性变形的情况如图 9 所示。其中弹性变形取各级荷载卸载后瞬时回复的竖向变形,而塑性变形取各级荷载作用下的总竖向变形减去此级荷载作用下的弹性变形。

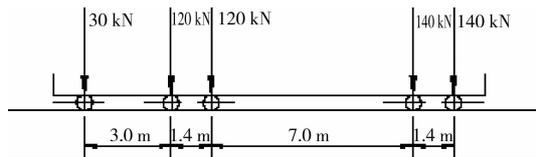


图 8 车辆荷载图

表 5 计算模型加载超载情况表

| 试验荷载/kN | 路基顶面应力/kPa | 超载荷载比/% |
|---------|------------|---------|
| 100     | 24.5       | -22.5   |
| 140     | 34.3       | 22.5    |
| 180     | 44.1       | 57.5    |
| 220     | 53.9       | 92.5    |

备注:路基顶面换算标准应力为 28 kPa。

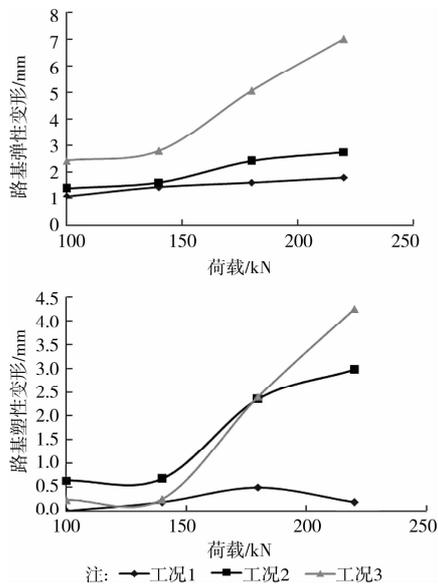


图 9 荷载作用下路基弹/塑性变形曲线

根据图 9 试验结果可知,试验路基的弹性变形或塑性变形随浸水水位的提高而增大,说明粉土路基具有显著的水敏感性,粉土路基随含水量的增大,其强度衰减,致使路基在同级荷载的作用下,弹塑性变形均增大;同时,从图 9 的荷载变形曲线可以看出,试验加载小于等于标准荷载(140 kN)时,各工况的变形曲线较平缓,随荷载的增大,弹塑性变形均提

高不大,但是,当试验加载大于标准荷载(140 kN)时,除工况 1 新建路基外,其余 2 工况浸水路基的弹塑性变形均增加显著,可见,超载对新建路基的变形影响较小,而对浸水路基的弹塑性变形影响显著。

## 3 结论

1)黄泛区粉土路基具有显著的毛细现象和水敏特性。毛细水上升区域土体变形模量减小,易产生较大的弹、塑性变形,且变形值随着路基湿化程度的增加不断增大;同时塑性变形易在浸水饱和区域积聚产生,低附加应力水平下亦会产生较大的塑性变形。

2)黄泛区粉土路基在良好的施工控制下,具有较好的抗变形能力;但路基浸水后,超载交通作用下,弹塑性变形剧增,因此应加强粉土路基的截、排水设计,以保证粉土路基的工作性能。

3)荷载作用下路基内部附加应力主要集中在路床区,路床以外迅速减小;随着荷载的增加,路基上部竖向附加应力增大的速率快,下部增大的速率慢;随浸水水位的提高,路基内部附加应力曲线与路基 0.2 倍自重应力线偏离越远,即荷载对路基的影响深度越大。

4)针对浸水病害路基的加固处理应考虑提高下部浸水区域的路基强度,克服仅对受力较大的路床区进行加固处理的片面思路。

## 参考文献:

- [1] 宋修广,张宏博,王松根,等. 黄河冲积平原区粉土路基吸水特性及强度衰减规律试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(10): 1594-1600.  
Song X G, Zhang H B, Wang S G, et al. Hydrophilic characteristics and strength decay of silt roadbed in Yellow River alluvial plain [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(10): 1594-1600.
- [2] 肖军华,刘建坤,彭丽云,等. 黄河冲积粉土的密实度及含水率对力学性质影响[J]. 岩土力学, 2008, 29(2): 409-414.  
Xiao J H, Liu J K, Peng L Y, et al. Effects of compactness and water Yellow-River r alluvial silt content on its mechanical behaviors [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(2): 409-414.
- [3] Chai J C, Miura N. Traffic-load-induced permanent deformation of road on soft subsoil [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(11): 907-916.
- [4] 邓学钧. 路基路面工程[M]. 3 版. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- [5] 凌建明,王伟,邬洪波. 行车荷载作用下湿软路基残余

- 变形的研究[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2002, 30(11): 1315-1320.
- Ling J M, Wang W, Wu H B. On residual deformation of saturated clay subgrade under vehicle load [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2002, 30(11): 1315-1320.
- [6] 彭丽云, 刘建坤, 肖军华, 等. 京九线路基压实粉土力学特性的试验[J]. 北京交通大学学报:自然科学版, 2007, 31(4): 56-60.
- Peng L Y, Liu J K, Xiao J H, et al. Mechanics properties of compacted silt on Beijing-Kowloon Railway [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2007, 31(4): 56-60.
- [7] 贾朝霞, 朱海波, 商庆森, 等. 黄泛区粉性土路基基本特性与施工技术探讨[J]. 公路交通科技, 2008, 25(9): 52-57, 62.
- Jia Z X, Zhu H B, Shang Q S, et al. Study on fundamental characteristics and construction techniques of study soil subgrade in the Yellow River Flood Field [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(9): 52-57, 62.
- [8] 朱志铎, 刘松玉, 孙海军. 江苏徐宿地区粉土的基本特性及加固方法研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(7): 1155-1158.
- Zhu Z D, Liu S Y, Sun H J. Study of stabilized silt in Xu-Su area [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(7): 1155-1158.
- [9] Xiao J H, Liu J K. Research on the deformation behaviors of silt subgrade soil under cyclic loading [J]. China Railway Science, 2010, 31(1): 1-8.
- [10] 商庆森, 朱海波, 杜红庆. 行车荷载和填筑高度对粉性土路堤变形的影响[J]. 公路交通科技, 2004, 21(1): 22-25.
- Shang Q S, Zhu H B, Du H Q. Effect of traffic load and fill height on the silt embankment's deformation [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21(1): 22-25.
- [11] 宋修广, 张瑜洪, 张海忠, 等. 黄泛区粉土路基强度衰减对路面结构的影响分析[J]. 公路交通科技, 2010, 27(5): 30-35.
- Song X G, Zhang Y H, Zhang H Z, et al. Analysis on pavement structure performance influenced by strength degradation of silt subgrade in Yellow River Inundated Area [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(5): 30-35.
- [12] 朱志铎, 郝建新, 赵黎明. 交通荷载作用下粉土路基变形特性分析[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(5): 1013-1019.
- Zhu Z D, Hao J X, Zhao L M. Deformation characteristics of silt subgrade under traffic loads [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(5): 1013-1019.
- [13] 朱志铎. 粉土路基稳定理论与工程应用技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2006.
- [14] 杨黎. 饱和粉土路基的变形特性研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2010.
- [15] 管延华. 强度衰减路基稳定性及其路面结构力学响应研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2011.
- [16] 中华人民共和国交通部. JTG B01—2003 公路工程技术标准[S]. 北京, 2003.

(编辑 胡英奎)