

文章编号:1671-6833(2017)01-0011-05

交通荷载作用下低填道路软土地基的动力响应分析

张 浩¹, 杨 玲², 郭院成¹

(1. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州市市政设施维修建设有限公司, 河南 郑州 450000)

摘 要: 为了揭示交通荷载对低填道路下卧软土地基的动力影响规律, 对软土地基的动孔隙水压力进行了现场测试, 分析了不同上部路堤厚度和行车速度工况下地基孔隙水压力的分布规律, 并据此借助数值模拟对长期交通荷载作用下软土地基的附加沉降进行计算分析. 结果表明: 上部路堤结构对交通荷载的动力激励具有消减作用, 填筑厚度越小, 下卧软土地基的动力响应越明显, 且随着深度的增加动孔隙水压力呈衰减趋势, 长期交通荷载作用下软土地基的附加沉降呈近似指数型非线性增长.

关键词: 低填路堤; 交通荷载; 动力响应; 动孔隙水压力; 软土地基

中图分类号: TU413.6 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2016.04.027

0 引言

道路建设中高填方路堤往往存在用地紧张问题, 伴随节能省地型建设政策的不断深化, 我国部分城市和地区已在道路工程中采取低填路堤设计方案, 如江苏连盐高速连云港段即采用了低路堤结构, 路堤填土高度为 1.56 ~ 1.68 m^[1]. 路堤高度的降低客观上降低了结构自重荷载, 有利于工程建设中对路基稳定与沉降的控制, 但下卧地基中一部分软土层将位于车辆荷载作用的深度范围内, 受车载附加荷载影响将产生新沉降变形, 且伴随运营时间的增长, 势必出现较大工后沉降问题, 造成安全隐患. 例如: 日本道路协会对交通荷载作用下低路堤软土地基的沉降实测分析发现, 开放交通后附加沉降达 10 ~ 15 cm, 约为建设期沉降量的一半^[2]; 另一条建在灵敏性软土上的高速公路开放交通 4 a 后产生 70 cm 的附加沉降^[3]. 由此可见, 交通荷载作用下低填路堤软土地基的动力响应与长期累积变形效应显著, 且严重影响交通设施的耐久性和线路的安全运营.

交通循环荷载作用下路基的动力特性, 是引起道路运行条件恶化的关键因素. 因此, 有必要对交通循环荷载作用下路基(尤其是软黏土路基)的动力特性开展研究. 目前, 该方面研究多采用室

内试验^[4-5]、理论解析计算^[6-7]、数值模拟^[8-10]和现场实测^[11-13]等方法. 其中, 室内试验多采用动三轴或循环剪切试验模拟软土的循环受荷效应, 便于揭示循环荷载作用下软土的变形特性和软化效应, 但仍存在材料相似性和尺寸效应等问题; 理论解析计算则往往需要一定的简化假定, 其表达式亦相对复杂, 求解往往需要专业的计算软件, 故而不利于工程人员应用; 数值模拟可以较全面地考虑各因素的影响, 是工程分析与理论计算的常用方法; 现场实测能直观地反映交通荷载的作用情况, 且较真实地揭示土体动力响应的演化规律^[1,14], 但往往受到实验工况与条件限制, 相关的现场监测实例并不多见.

据此, 笔者以江苏某沿江城市道路为背景, 通过对低填路段下卧软土层中动孔隙水压力的现场监测, 揭示行车荷载作用下低填路堤软土地基的动力响应规律. 并在此基础上, 考虑运营期交通荷载的长期作用, 对路基附加沉降变形进行了计算分析, 为工后沉降控制提供依据.

1 现场试验分析

1.1 工程概况

江苏某沿江城市道路受城区高程整体控制, 局部采用低填路堤结构, 设计时速 60 km/h. 考虑

收稿日期: 2015-09-06; 修订日期: 2015-10-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41272132); 南京市交通科技资助项目(宁交安 2009-22-18)

作者简介: 张浩(1985—), 男, 河南永城人, 郑州大学讲师, 博士, 主要从事地基与基础工程研究, E-mail: tmzhanghao@zzu.edu.cn.

线路区域浅表层有软弱地基土层露出,设计采用 60 cm 碎石土一次抛填的基底处置方案,低填路段在此基础之上进行路堤、路床和路面结构层施工,典型断面如图 1 所示.

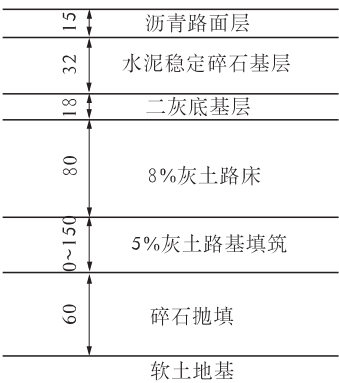


图 1 路堤断面示意图(单位:cm)

Fig.1 Road embankment sectional drawing

考虑到路堤结构的力学性能与稳定性要求,路堤与路床采用 5%~8% 的石灰改良土填筑,路面结构层分别为 15 cm 沥青面层、32 cm 水泥稳定碎石基层和 18 cm 二灰底基层.下部地基土层主要为淤泥质亚黏土层、亚砂土和粉砂,局部呈现淤泥质黏土层与粉砂的交互分布.其中淤泥质亚黏土层上覆较薄硬壳层(0.8~3.2 m),呈流塑状,力学性能较差,为道路沿线主要不良土层,其物理力学指标如表 1 所示.

表 1 淤泥质亚黏土物理力学指标

Tab.1 Physical and mechanical indexes of silt clay			
层厚	含水率	孔隙比	塑性指数
h/m	$w/\%$	e	I_p
0.8~8.2	35.1~47.0	0.85~1.33	10.3~19.8
液性指数	压缩系数	压缩模量	标贯击数
$I_L/\%$	a_{1-2}/MPa^{-1}	E_{s1-2}/MPa	N
0.99~19.1	0.4~0.94	2.2~4.76	0.9~1.9

1.2 试验方案

为了直观揭示路堤软土地基在交通荷载作用下的动力响应,现场通过埋设动孔隙水压力对 3 个典型断面基底软土地基的动力响应进行了监测.其中,断面 A、断面 B 和断面 C 软基上覆路堤结构整体厚度(路面结构+路床+路基填筑+基底碎石层)分别为 2.05、2.45、3.55 m,其相应动孔隙水压力计埋设如图 2 和表 2 所示,主要分布于路堤基底以下 7 m 范围内软土层中.

为了提高测试精度,地基浅层(<4 m)采用

微型动孔隙水压力计,如图 3 所示.试验采用了 DH-3817 动静应变测试系统进行数据采集,测试行驶车辆采用标准配重车(后轴重 100 kN,宽 1.8 m),测试速度分别为 60、80 km/h,以考虑行车速度对软基动力响应的影响.

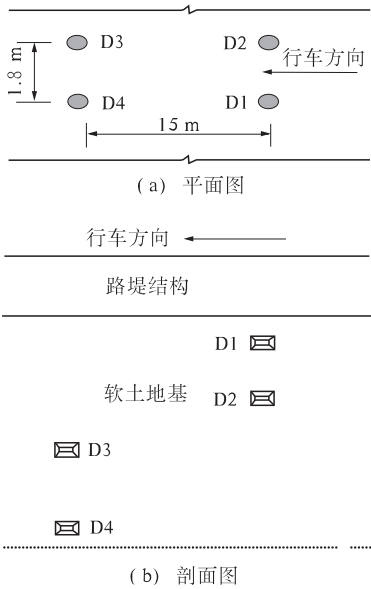


图 2 孔压力计埋设示意图

Fig.2 Burying position of piezometers

表 2 动孔隙水压力计的埋深情况

Tab.2 The depths of piezometers			
编号	断面 A	断面 B	断面 C
D1	3.0	3.0	4.5
D2	5.0	5.0	6.5
D3	7.0	6.5	—
D4	10.0	9.0	—

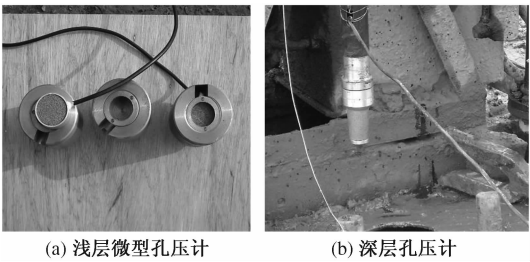


图 3 现场动孔隙水压力计

Fig.3 Pictures of piezometers

1.3 测试结果分析

行车速度分别为 60 和 80 km/h 时 3 个测试断面的动孔隙水压力滤波时程曲线如图 4 和图 5 所示.其中,断面 A 中 10 m 埋深处的动孔隙水压力计由于导线受施工影响损坏,而无法正常工作,其它断面各孔压计测试正常.从测试结果可

以看出,在行车荷载作用下,路堤下卧软土地基浅层处动力响应比较明显,且动孔隙水压力出现双峰值的现象,通过分析认为,这应该是由测试车辆前、后轴逐次通过引起的。

考虑软土地基上部路堤结构整体厚度的影响,从图 4 和图 5 可以看出:随着路堤结构整体厚度的增加,动孔隙水压力峰值逐渐减小,且峰值曲

线由较为明显逐渐变得平滑,动孔压的消散速度也逐渐变慢,相对荷载具有一定的滞后性;随着距离路面深度的增加,前轴轴载作用产生的第一峰值逐渐减小,直至与后轴对应的第二峰值共同形成一个平滑峰值曲线,这说明车辆对下卧软土地基产生的动应力随着深度的增加而迅速衰减,且较深处的土体表现出一定的滞后效应。

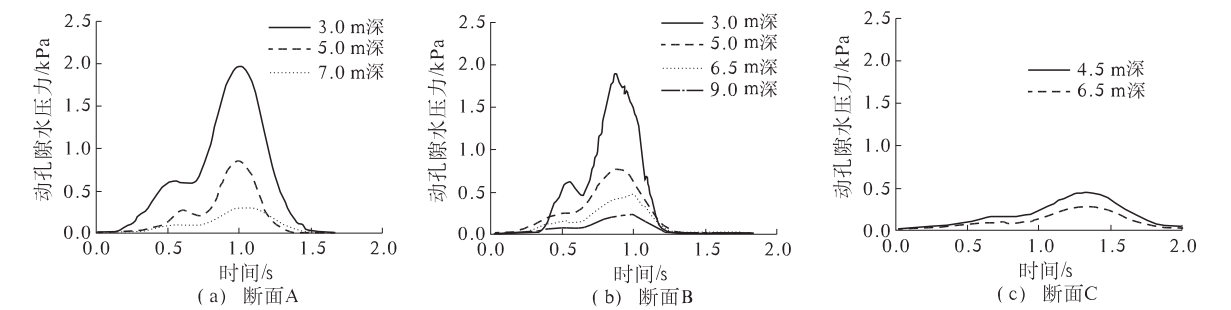


图 4 行车速度 60 km/h 时各断面测试结果
Fig. 4 Test results in 60 km/h running speed

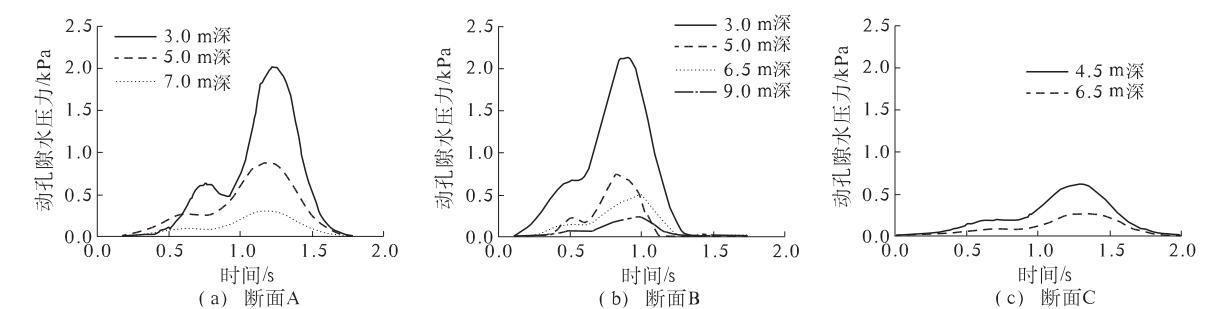


图 5 行车速度 80 km/h 时各断面测试结果
Fig. 5 Test results in 80 km/h running speed

考虑不同行车速度的影响,从图 4 和图 5 中可以看出:行车速度 60 km/h 时的动孔隙水压力滤波时程曲线与 80 km/h 时的分布特点基本一致,仅动孔压峰值略有降低.这主要是由于路面平整度良好,车速变化对车辆所受动力激励的影响不明显,从而使其施加于路基的动力变化不显著。

2 长期附加沉降的计算分析

长期交通循环荷载作用下软土地基的附加沉降是其动力响应的宏观表征,直接影响着道路运营时的舒适度和可靠性.据此,为了进一步揭示长期交通循环荷载对路堤下卧软土地基的动力影响,采用数值分析的方法对地基附加沉降进行计算分析。

以断面 B 为基础,采用 ABAQUS 有限元软件建立简化平面计算模型,考虑交通荷载影响,模型

宽度 30 m,深度 15 m;车辆荷载取设计规范中单轴双轮 100 kN,轴长 1.8 m,车速 60 km/h.为更好地反映交通荷载对下卧软土地基的影响,根据上述现场实测结果,采用半正弦波形近似模拟行车荷载作用,即仅考虑行车荷载的时间效应.根据勘察土工试验结果,各结构层计算参数如表 3 所示.其中,为建模网格划分方便,将沥青混凝土面层、水泥稳定碎石基层和二灰土底基层简化为一层等效弹性材料作为路面结构层。

图 6 为单次行车荷载作用时路基应力与位移云图,当作用荷载达到最大时,沿深度提取车轴中心对应位置不同深度处的竖向应力如图 7 所示.综合图 6 和图 7 可以看出,交通荷载影响较明显的区域约为 3~5 m.其中,在路面下约 5.25 m 处的竖向应力约为路面顶竖向应力的 5%,且竖向位移的分布亦呈衰减的分布特征。

表 3 各结构层计算参数
Tab. 3 Calculation parameters of each layer

材料类型	厚度/ m	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	回弹模量/ MPa	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	阻尼比
路面结构	0.65	2 300	1 270	0.30	—	—	0.9
路基填土	0.80	1 880	50	0.35	88.1	18.4	0.4
碎石层	0.60	2 500	30	0.25	50.0	30.0	0.8
淤泥质亚黏土	3.00	1 810	3.49	0.35	16.0	4.6	0.4
亚砂土	5.00	1 770	3.91	0.35	11.8	19.5	0.4
粉砂	—	1 867	10.92	0.35	4.6	32.0	0.4

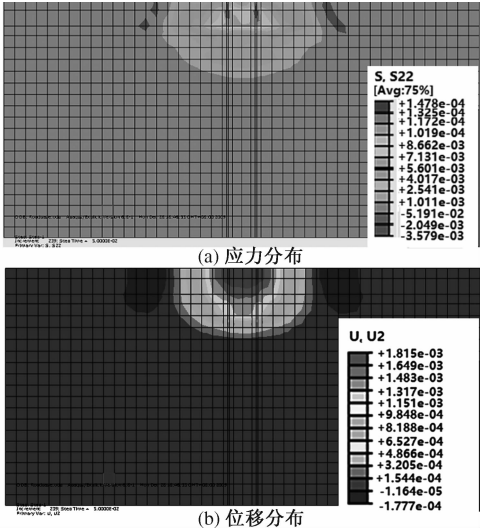


图 6 单次行车作用计算结果
Fig. 6 Calculation results after once traffic load

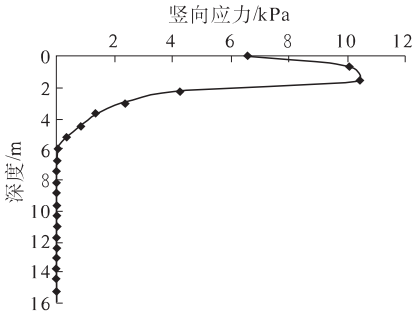


图 7 竖向应力与深度的关系
Fig. 7 Relationship between vertical stress and depth

考虑荷载循环次数对软土地基附加沉降的影响,分别对循环次数为 3 000、300 000、600 000、1 000 000 时的附加沉降变形进行计算,如图 8 所示.从图 8 可以看出,随着循环次数的增加,附加沉降随之增大.交通循环次数不同,沉降量增大的速度不同,即开始阶段累计附加沉降量增大较快,但随着循环作用次数的增加,累计附加沉降量增大幅度趋势逐渐减缓.据此,根据道路设计交通量、车辆组成、交通增长率,结合设计使用年限,通过换算车道累计当量轴次,即可对道路运营期的

附加沉降变形进行估算,从而为工后沉降控制提供依据.

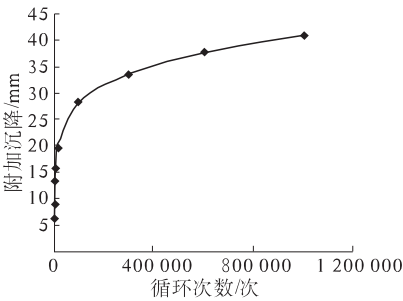


图 8 循环次数与软土地基累积沉降关系
Fig. 8 Relationship between cycle numbers and accumulated settlement

3 结论

- 1) 上部路堤结构对交通荷载动力激励具有一定的消减作用,下卧软土地基动孔隙水压力随路堤结构整体厚度的降低而增大,低填路堤软土地基的交通动力响应不容忽视.
- 2) 相同路堤结构层工况下,下卧软土地基动孔隙水压力随深度增加呈衰减变化趋势,且动孔隙水压力时程曲线越来越平滑,由双峰曲线逐渐均化为平滑曲线.
- 3) 长期交通荷载作用下,软土地基附加沉降随行车荷载作用次数的增加呈近似指数型非线性增长.

参考文献:

[1] 赵俊明,刘松玉,石名磊,等. 交通荷载作用下低路堤动力特性试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2007,37(5):921-925.
[2] 日本道路协会. 道路土工软土地基处理技术指南[M]. 蔡思捷,译. 北京:人民交通出版社,1989.
[3] TASHIRO M, NODA T, INAGAKI M, et al. Prediction of settlement in natural deposited clay ground with

risk of large residual settlement due to embankment loading [J]. Soils and foundations, 2011,51(1):133 – 149.

[4] 霍海峰,雷华阳. 静动应力下正常固结黏土循环特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015,34(6): 1288 – 1294.

[5] HSU C C, VUCETIC M. Threshold shear strain for cyclic pore-water pressure in cohesive soils[J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2006,132(10):1 325 – 1 335.

[6] JING N, BUDDHIMA I, XUE Y G, et al. Model of soft soils under cyclic loading[J]. International journal of geomechanics, 2015, 15(4):1 – 10.

[7] 李兴照,黄茂松. 循环荷载作用下流变性软黏土的边界面模型[J]. 岩土工程学报, 2007,29(2):249 – 254.

[8] 牛力强. 交通荷载作用下港区道路受力特性研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2014,35(6): 95 – 99.

[9] 陈剑,苏跃宏. 交通荷载作用下公路路基动力特性的数值模拟研究[J]. 公路交通科技, 2011, 28(5): 44 – 48.

[10] SUIKER A S J, BORST R D E. A numerical model for the cyclic deterioration of railway tracks[J]. International journal for numerical methods in engineering, 2003,57(4): 441 – 470.

[11] SAMANG L, MIURA N, SAKAI A. Long-term measurements of traffic load induced settlement of pavement surface in Saga airport highway, Japan[J]. Journal teknik sipil, 2005, 12(4):275 – 286.

[12] FUJIKAWA K, MIURA N,BEPPU I. Field investigation on the settlement of low embankment road due to traffic load and its prediction[J]. Soils and foundations, 1996, 36(4):147 – 153.

[13] 崔新壮. 交通荷载作用下黄河三角洲低液限粉土地基累积沉降规律研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(1): 154 – 162.

[14] 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.

Analysis of Dynamic Response of Soft Soil Foundation Beneath Low Embankment under Traffic Load

ZHANG Hao¹, YANG Ling², GUO Yuancheng¹

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Zhengzhou Municipal Facilities Maintenance and Construction Co. ,Ltd, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: In order to reveal the dynamic response rules of soft soil foundation beneath low embankment under traffic load, the in-situ tests for the dynamic pore water pressure in soft soil stratum were conducted. The distribution laws of pore water pressure under different embankment thickness and different running speed were analyzed. In addition, the additional settlement of soft soil stratum under long-term traffic load was analyzed by numerical simulation. The results showed that embankment fills could reduce the dynamic effect of traffic load. The dynamic response of underling soft soil foundation increased with the decrease of the embankment thickness, and the dynamic pore water pressure declined with the depth increases. Moreover, the long-term addition settlement of soft soil foundation could be expressed as exponential function of time under traffic load.

Key words: low embankment; traffic load; dynamic response; dynamic pore water pressure; soft soil foundation