

文章编号:1671-6833(2013)04-0010-05

交通荷载作用下高填方涵洞动力响应研究

张 军, 申俊敏, 赵建斌

(山西省交通科学研究院 黄土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室, 山西 太原 030006)

摘 要:通过建立高填方路堤下拱涵数值模型,对拱涵修筑和路堤填筑过程进行了模拟.在道路顶面沿纵向施加循环交通荷载,探究拱涵在交通荷载作用下的受力与变形的动力响应.着重论述了荷载循环次数、荷载大小以及行车速度对拱涵动力响应的影响.结果表明:在交通荷载作用下,拱圈结构受力较大,为拱涵最薄弱的位置;当荷载循环次数大于8次时,路面沉降与涵顶垂直土压力趋于稳定;涵顶土压力随交通荷载的增大而逐渐增加;行车速度对涵顶垂直土压力和基底土压力影响较小.

关键词:交通荷载;高填方路堤;涵洞;动力响应

中图分类号: U449.84

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2013.04.003

0 引言

近年来,随着高速公路的迅猛发展,交通荷载对路基路面的影响越来越受到人们的重视.交通荷载是一种大小和位置时刻变化的动荷载,随着车流量和载重量不断增加,交通荷载对路基路面受力变形特性的影响也越来越大.实践表明:交通荷载作用下路基产生较大的工后沉降和不均匀变形,对公路的使用寿命和行车安全产生严重的影响,特别是超载车辆在不平整路面上行驶对路面结构产生的影响更大^[1-3].

Monismith等^[4]采用弹性层状体系理论,考虑荷载频率及车辆速度的影响,对聚酯玻纤布复合沥青混合料的疲劳性能进行了分析.边学成等^[5]在求解路堤下卧层地基中动偏应力分布的基础上,计算了路堤下卧层地基动力附加沉降的发展过程和分布规律.曹志刚等^[6]采用4个均布矩形荷载来模拟车辆荷载,数值计算表明荷载移动速度等因素对道路系统位移响应的影响比较显著.刘萌成等^[7]采用Fourier积分变换与递推矩阵的方法,推导出不同形式移动条形荷载作用下弹性层状介质动应力的解析解.由于交通荷载的随机性和不确定性,很难准确地对其影响进行分析,国内外许多学者^[8-10]通过等效过程、数值模拟等方

法对交通荷载进行了模拟,但重点都放在交通荷载对路基路面或者地下浅埋结构的受力及变形特性的影响,很少涉及地下深埋结构在交通荷载下的动力响应规律.

现有研究主要集中在涵顶土压力的计算和涵洞地震动力响应等方面,较少考虑交通荷载的影响.笔者利用有限差分软件FLAC3D建立了高填方路堤下拱涵的有限差分模型,在静力填筑结构的基础上,选取道路的纵断面,进行了交通荷载作用下涵洞的动力响应研究.

1 工程概况

岢岚至临县高速公路是《山西省高速公路网规划》“3纵11横11环”中西纵高速公路的重要组成部分,也是山西省西部串联第四横及第五横高速公路的重要路段.岢临高速公路路线地形起伏较大,河谷发育,沟壑纵横.推荐方案路基填方高度大于20 m的路段共108段,总长10.1 km,最大填方高度达50.4 m.

涵洞左侧距离岸坡 $L_L=13.6$ m,坡角 30° ,涵洞右侧距离岸坡 $L_R=0$ m,坡角 45° .涵洞洞身高度为4 m,跨径为2 m,拱圈厚度为0.4 m,翼墙平均厚度为1.37 m,涵顶填土高度为20 m.

收稿日期:2013-03-28;修订日期:2013-05-10

基金项目:山西省交通建设科技项目(11-2-17);黄土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室开放课题(KLTLR-Y11-3)

作者简介:张军(1986-),男,湖北鄂州人,工程师,博士,主要从事路基工程及特殊土地基处理的研究工作,Email:zj_sxjt@hotmail.com.

2 数值模拟

2.1 网格划分与参数选取

计算模型的几何尺寸和材料参数选取得当与否,会直接影响计算结果的正确性与精度. 为了能够反映现场实际情况,数值计算模型尺寸与实际工程相同,建立了如图 1 所示的数值计算模型,以研究循环交通荷载作用下拱涵及周围土体的位移响应特性. 为了研究路面沉降随循环荷载的动力响应规律,对路面节点(C,D,E,F,G,H,I)的沉降进行监测.

计算模型中,宽度取 110 m,涵底地基深度取 25 m,涵顶填土高度为 20 m,以减小边界效应对计算结果的影响. 假设涵洞为线弹性材料,地基土与填土设为弹塑性模型,均采用 Mohr - Coulomb 屈服准则. 基于平面应变问题建立数值模型,其底面约束水平和竖直方向位移,两侧约束水平位移. 模型具体材料参数见表 1.

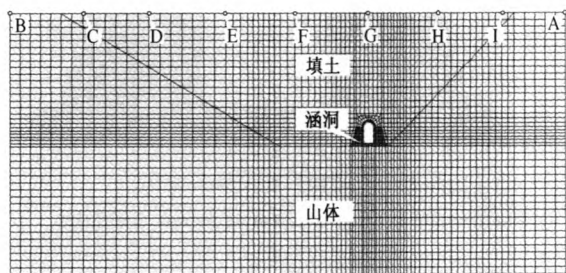


图 1 数值计算模型
Fig.1 Numerical model

表 1 数值模拟计算参数

Tab.1 Material parameters in the numerical model			
参数	涵洞	填土	山体土
弹性模量 E/MPa	30 000	25	8.5
泊松地 μ	0.2	0.33	0.33
有效黏聚力 c/kPa	—	20	16.5
有效内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	—	18	30.5
密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2 400	1 800	1 600

如图 2 所示,为了得到拱涵拱圈构件的内力响应规律,对拱圈结构(M,N,O,P,Q)的内力进行监测.

2.2 计算思路与模型标定

首先模拟山体地应力平衡、涵洞的修筑和路堤的分层填筑过程. 静力计算平衡后,清除速度场与位移场,开始进行涵洞动力计算. 动力计算时,四周边界采用自由场边界,在提供了与无限场地相同效果的同时,减少了模型边界上反射波对动

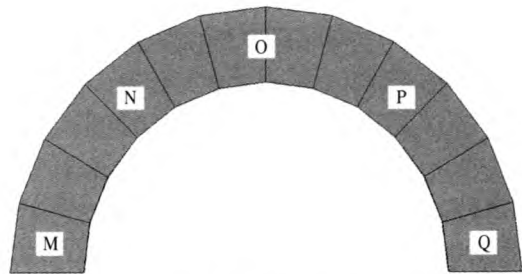


图 2 拱圈单元监测点编号
Fig.2 Monitoring point numbering of arch ring

力分析结果的影响. 力学阻尼采用局部阻尼,阻尼系数为 0.157 1. 由于模型网格尺寸不均匀、单元刚度差异较大,计算时采用动态多步的方法来减少计算时间. 车辆对路面作用假设为宽 10 m、大小 20 kPa 的均布荷载,车辆以 60 km/h 的速度从右向左行驶,即从 A 点到 B 点为一个循环. 探求涵洞在交通荷载作用下的动力响应特性,并研究拱涵涵顶土压力系数、基础底面土压力以及拱涵结构薄弱处在不同条件下的内力及变形情况.

如表 2 所示为路堤填筑完毕时涵顶和洞墙背两侧 2.5 m 处土压力数值模拟结果与现场试验监测数据,可以看出数值模拟结果与监测数据相差不大,且两者分布规律相同,验证了笔者数值模型的合理性.

表 2 数值模拟结果与监测结果对比

Tab.2 Comparison of numerical results with field measurements			
项目	涵顶土压力	墙背左侧	墙背右侧
数值模拟	400.6	364.6	379.8
监测数据	424.8	356.2	361.7

3 拱涵动力响应特性研究

如图 3 所示,交通荷载循环 10 次后,路面不同监测点的最大沉降不同. 从图中可以看出,越靠近山体,路面沉降越大,涵洞轴线上路面沉降较小,路面最大沉降差在 3 cm 以内.

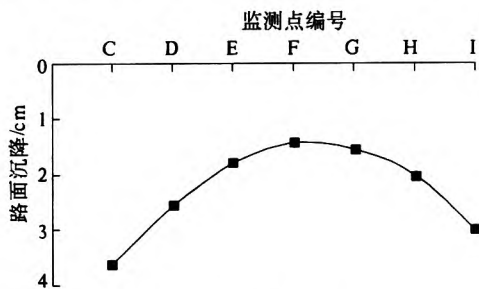


图 3 路面最大沉降
Fig.3 The maximum settlement of embankment crest

如图 4 所示,交通荷载循环 10 次后,拱涵结构的水平位移呈层状分布,涵顶与基础底面最大水平位移差约为 0.7 mm,这表明涵洞结构承受水平的剪切力,但由于水平位移差较小,涵洞水平方向较为稳定.拱涵竖向位移云图如图 5 所示,拱涵基底正应力云图如图 6 所示.交通荷载循环 10 次后,涵洞靠近山体一侧沉降略大于另一侧沉降,涵洞结构发生向右倾斜,靠近山体一侧基底压力明显大于另一侧基底压力.该现象与一般岩质山体涵洞偏载效应相反,主要原因是因为黄土山体模量明显小于填土模量,而岩质山体模量远大于填土模量,两者刚度差引起的.如果没有相应的地基处理措施,由于偏载效应的影响,循环荷载作用下右侧基底地基土可能先发生屈服.

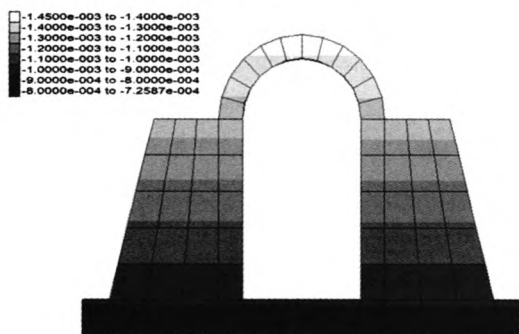


图 4 拱涵水平位移云图

Fig. 4 Shading of horizontal displacement of culvert

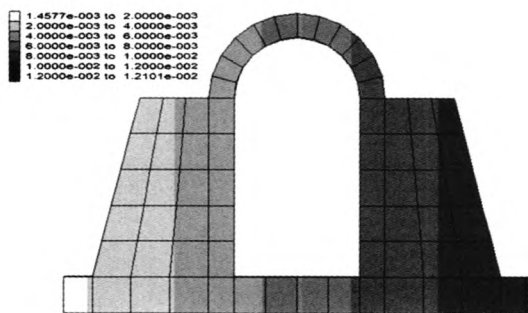


图 5 拱涵竖向位移云图

Fig. 5 Shading of vertical displacement of culvert

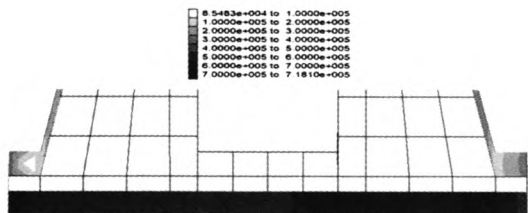


图 6 拱涵基底正应力云图

Fig. 6 Shading of normal stress of culvert

如图 7 和图 8 所示,拱圈结构应力大于侧墙

和基础的应力,因此,在交通荷载作用下,拱圈结构为涵洞最薄弱位置,有必要对拱圈单元进行受力分析.

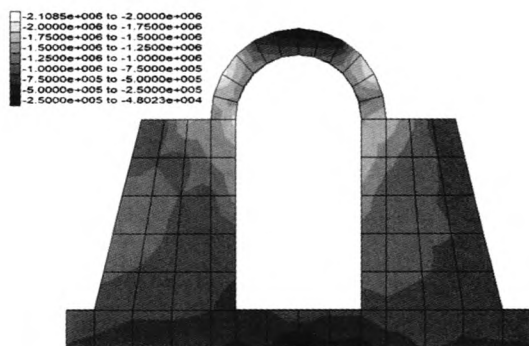


图 7 拱涵结构竖向应力云图

Fig. 7 Shading of vertical stress of culvert

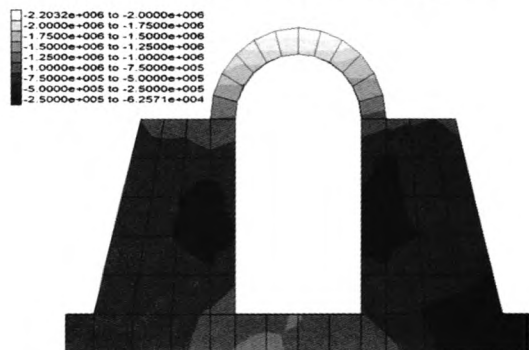


图 8 拱涵结构水平应力云图

Fig. 8 Shading of horizontal stress of culvert

4 参数分析

以徐工集团生产的自卸卡车 NXG3310D3ZEL 为例进行参数分析. 卡车整备质量 14 760 kg, 额定载质量 16 020 kg, 最大总质量 30 995 kg, 最高时速 80 km/h. 车辆总长 10.5 m, 轮胎断面为 0.25 m.

4.1 交通荷载循环次数的影响

如图 9 所示,随着交通荷载循环次数的增加,路面监测点 G 的沉降逐渐增大,但增量逐渐减小. 当交通荷载循环次数大于 8 时,路面监测点 G 的沉降变化趋于稳定,塑性变形不再增加.

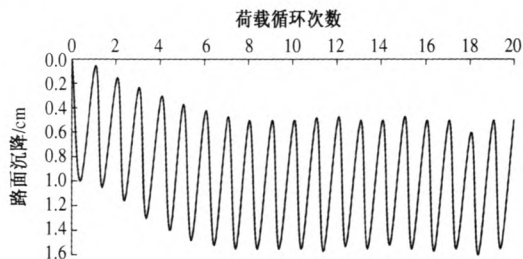


图 9 循环荷载次数对路面沉降的影响

Fig. 9 Influence of cycle times on settlement

如图 10 所示,随着交通荷载循环次数的增加,涵顶垂直土压力变化趋势与路面沉降类似,循环次数大于 8 时,涵顶垂直土压力趋于稳定。

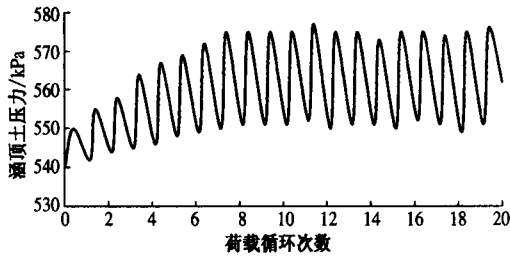


图 10 循环荷载次数对涵顶垂直土压力的影响
Fig. 10 Influence of cycle times on vertical stress at the top of culvert

4.2 交通荷载大小的影响

如图 11 所示,随着循环荷载的增大,路面各监测点沉降及路面沉降差均有所增加,因此,超载车辆将对路面的平整性有较大的影响。

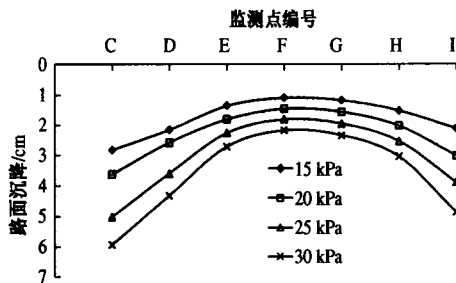


图 11 交通荷载大小对路面沉降的影响
Fig. 11 Influence of traffic loads on settlement

如图 12 所示,随着交通荷载的增大,涵顶土压力系数逐渐增加。高填方涵洞在路堤填筑的过程中,涵洞内外土柱之间的差异沉降导致涵顶土压力系数较大,在交通荷载作用下,这种效应更加明显。在超载车辆荷载的作用下,涵顶土压力系数有可能超过 1.45,这对涵洞结构的安全相当不利。因此,在交通荷载作用下,高填方涵洞应考虑相应的减载措施,减小不均匀沉降对涵洞结构的影响。

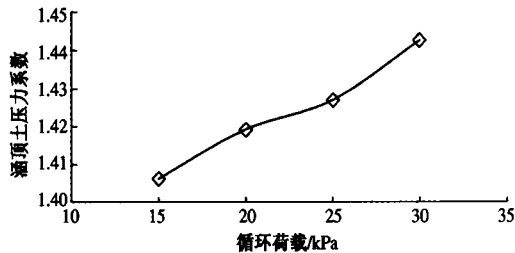


图 12 交通荷载大小对涵顶土压力系数的影响
Fig. 12 Influence of traffic loads on coefficient of earth pressure

4.3 行车速度的影响

如图 13 和图 14 所示,随着行车速度的增加,涵顶垂直土压力和基底垂直土压力均有所增大,但增幅较小。因此,行车速度对涵顶垂直土压力和基底垂直土压力影响较小。

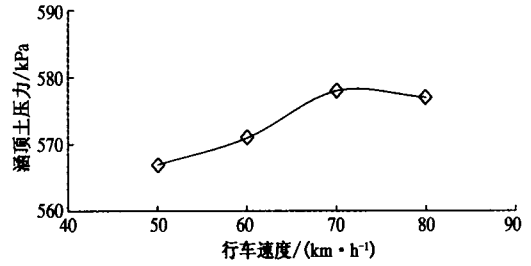


图 13 行车速度对涵顶垂直土压力的影响
Fig. 13 Influence of vehicle speeds on vertical stress at the top of culvert

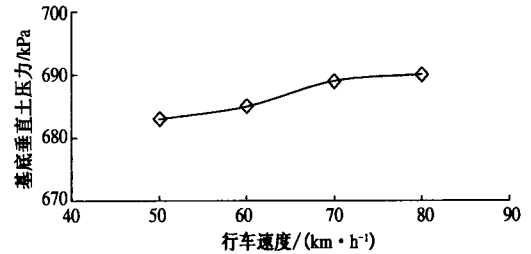


图 14 行车速度对基底垂直土压力的影响
Fig. 14 Influence of vehicle speeds on vertical stress at the bottom of culvert

5 结论

(1)在行车荷载作用下,涵顶与基底水平位移差较小,涵洞水平方向稳定;涵洞靠近山体一侧沉降略大于另一侧沉降,导致该侧基底压力大于另一侧基底压力;拱圈结构受到应力较大,为涵洞最薄弱位置。

(2)当交通荷载循环次数大于 8 次时,路面沉降与涵顶垂直土压力趋于稳定;交通荷载循环次数对基底垂直土压力影响较小。

(3)随着交通荷载的增大,路面各监测点沉降以及路面沉降差有所增加,涵顶垂直土压力逐渐增加。因此,应注意超载车辆对涵洞结构的影响。

(4)行车速度对涵顶垂直土压力和基底垂直土压力影响较小。

参考文献:

[1] SAKAI A, SAMANG L, MIURA N. Partially-drained cyclic behavior and its application to the settlement of

- a low embankment road on silty-clay [J]. *Soils and Foundations*, 2003, 43(1): 33 - 46.
- [2] 陶云川. 高路堤涵洞土压力计算方法研究[J]. *山西交通科技*, 2012, 215(2): 45 - 47.
- [3] 董忠红, 吕彭民. 交通荷载下沥青路面结构动力响应理论研究[J]. *郑州大学学报:工学版*, 2007, 28(4): 88 - 91.
- [4] MONISMITH C L. Analytically based asphalt pavement design and rehabilitation: Theory to practice (1962 - 1992) [M]. Washington: Transportation Research Record, National Research Council, 1992.
- [5] 边学成, 曾二贤, 陈云敏. 列车交通荷载作用下软土路基的长期沉降[J]. *岩土力学*, 2008, 29(11): 2990 - 2996.
- [6] 曹志刚, 蔡袁强, 徐长节. 移动车辆荷载作用下路面的动力响应[J]. *浙江大学学报:工学版*, 2009, 43(4): 777 - 781.
- [7] 刘萌成, 彭卫兵, 高玉峰. 移动条形荷载作用下弹性层状介质动应力解析解. *土木工程学报*, 2010, 43(3): 81 - 87.
- [8] 卢正, 姚海林, 骆行文, 等. 公路交通荷载作用下分层地基的三维动响应分析[J]. *岩土力学*, 2009, 30(10): 2965 - 2970.
- [9] 刘飞禹, 张乐, 余炜, 等. 交通荷载作用下桩承式加筋路堤性能分析[J]. *土木工程学报*, 2011, 44(S): 50 - 54.
- [10] 王直民. 交通荷载作用下埋地管道的力学性状研究[D]. 杭州: 浙江大学建筑工程学院, 2006.

Analysis of Dynamic Response of High Embankment Culverts under Traffic Loads

ZHANG Jun, SHEN Jun-min, ZHAO Jian-bin

(Key Laboratory of Highway Construction and Maintenance Technology in Loess Region, Shanxi Transportation Research Institute, Taiyuan 030006, China)

Abstract: A numerical model of arch culvert was established and the process of installation of the culvert and construction of the embankment were simulated. Then the traffic loads were applied on vertical section of the road, and parametric studies were carried out to investigate the influence of cycle times, traffic loads and vehicle speeds on the dynamic responses of arch culvert. The results show that the arch is the most vulnerable component of the whole culvert under traffic loads. After eight times cycle of traffic loads, the settlement of road surface and the vertical earth pressure on the top of culvert tends to be stable. The vertical earth pressure at the top of culvert increases as the traffic loads increase. The vertical earth pressures both at the top and bottom of culverts are not sensitive to the variations of the vehicle speeds.

Key words: traffic load; high embankment; culvert; dynamic response