

文章编号: 1005-0523(2007)04-0046-05

交通荷载作用下软土路基残余变形的研究

耿大新¹, 钟才根², 郑明新¹

(1. 华东交通大学 土木建筑学院, 南昌 330013; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要:通过对单个交通荷载作用下路面结构体系的数值模拟, 计算了路基中竖向动应力的变化, 并采用室内动三轴试验研究了软土地基在循环荷载作用下累积变形的规律; 通过对以上两项研究的结合, 建立了交通荷载作用下软土地基残余变形的计算方法, 并计算了不同类型的交通荷载引起的软土路基的残余变形量.

关键词:交通荷载; 软土路基; 残余变形

中图分类号: TU45

文献标识码: A

1 引言

随着经济发展, 我国的公路建设取得了突飞猛进成绩, 投入营运高等级公路越来越多, 到 2002 年底, 全国高速公路通车总里程达到 2.52 万公里. 但从使用情况上看, 随着交通量、车辆荷载的日益增大以及新建快速路的大量修筑, 暴露出的问题也越来越多, 部分道路破坏严重. 大量建在软粘土地基上的高速公路在运营期间表现出不均匀沉降. 日本道路协

害, 因此有必要研究交通荷载作用下路基的残余变形. 本文拟采用弹塑性有限元理论模拟路面结构体系在单个交通荷载作用下的应力分布及变形特性, 并结合软土地基在循环荷载作用下累积变形的规律, 分析不同类型的交通荷载引起的软土地基的残余变形.

2 交通荷载作用下路面结构体系动力反应的计算模型

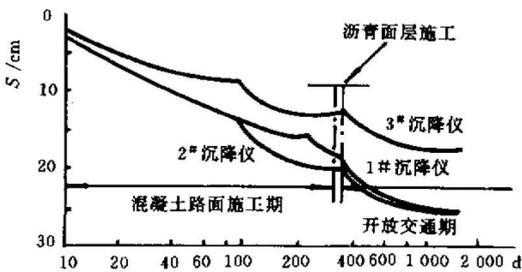


图 1 路堤施工中及投入使用后的沉降曲线

会曾对交通荷载引起的基础地基沉降作过一些实际观测, 结果如图 1 所示^[1]. 由图可见, 在道路路堤和路面荷载引起的沉降基础上, 道路交付运营以后, 在交通荷载的作用下, 增加了新沉降. 高速公路在行车荷载的反复作用下, 除了引起路面材料的疲劳破坏外, 还会因路基残余变形的累积而产生沉陷或车辙等病

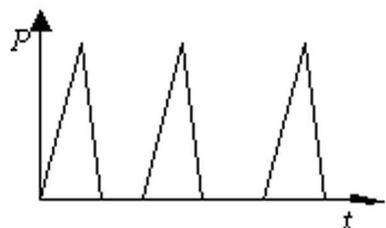


图 2 路面加载波形

(1) 交通荷载的动态特性及模拟

交通荷载的作用实际上是一种非平稳的随机过程. 该过程受很多因素的影响, 如交通量、轴载、车速、车型、路面平整度、汽车本身的激励作用及车与路之间的耦合等. 其作用力的大小、形式及作用点都是时间的函数^[2]. 以往研究表明^[3], 如果采用如图 2

所示的三角加载波形来模拟路面承受的交通荷载,对典型路面结构而言,其相关系数大于0.9,因此本文拟采用三角加载波形模拟作用在路面的交通荷载,其幅值由车辆的类型确定,作用时间 t 由轮胎的着地长度及车速确定。

(2) 路面结构体系的动力计算模型

路面结构体系的动力响应非常复杂,它不但与其本身的物理力学特性有关,而且还受交通荷载的动力特性的影响^[4]。不断变化的交通荷载作用在高速公路上,引起路面的振动。

这一振动并路基深部传播,并引起路面结构体系的变形。

对于一个典型的多层路面体系,在交通荷载作用下,系统处于动态平衡,满足 Lagrange 运动方程^[5]:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{f\} \quad (1)$$

式中: $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ —分别为体系的质量矩阵,阻尼矩阵及刚度矩阵;

$\{\ddot{u}\}$ 、 $\{\dot{u}\}$ 、 $\{u\}$ —分别为相对加速度向量,相对速度向量和相对位移向量;

$\{f\}$ —荷载向量。

求解式(1)可得结构体系的瞬态反应,文中采用 Marc 三维有限元程序进行模拟,计算中取公路路面轴线为 z 轴,垂直于轴线的截面为 xy 平面,重力方向为 y 轴。三维动力计算模型在垂直于公路轴线的方向上长度为60m,在两侧平行于公路轴线的长度为30m,地基深度为10m,计算网格如图3所示。

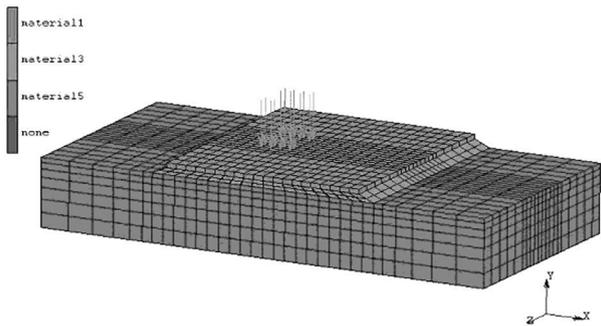


图3 三维动力计算模型

高速公路路面结构、路基及地基承受的荷载主要是竖向荷载,如路面车辆荷载及路面、路基和地基的自重荷载等。为了模拟由竖向荷载产生的变形,假设底部界面在 z 轴方向上不发生位移。路面上承受点荷载的冲击荷载,该荷载的影响范围有限,假设计算模型的边界处已在其影响范围以外,垂直于公路轴线的方向上两侧垂直于公路轴线的界面在 y 轴方向上不发生位移;两侧平行于公路轴线的边界

面在 x 轴方向上不发生位移;上部边界为自由边界。地基四周采用阻尼边界,以减小波在边界面的反射所引起的计算误差。

(3) 计算参数

高速公路的柔性路面为多层次结构物,选用典型的路面结构层^[6]。计算时将四层弹性材料的结构物简化为单层等效弹性材料,采用串联弹性体的等效弹性模量的计算方法确定单层等效材料的等效弹性模量,具体参数如表1所示。路基采用弹性模型,弹性模量取为20 MPa。地基土的本构模型选为弹塑性模型,并采用 Mohr-Coulomb 准则作为屈服准则,其材料特性参数有内聚力、内摩擦角和弹性模量等。数据参照典型软土的土工试验结果,如表2所示。

表1 路面结构参数

	沥青混凝土	沥青贯入碎石	石灰土	天然砂砾
厚度(cm)	10	10	20	30
弹性模量(MPa)	1 500	700	1 100	100
等效弹模(MPa)	206			

表2 地基土的特性参数

重度(kN/m ³)	内聚力(kPa)	内摩擦角(°)	弹性模量(MPa)
17.5	12	10	3.5

(4) 计算工况

运营过程中,路面不仅承受运输车辆的垂直向下的压力,而且还要承受车辆在运动过程中的冲击和振动力。车辆的重量越大,其冲击和振动力也就越大,从而造成公路、桥涵等构造物的变形和位移。美国 AASHO 道路实验所的研究表明,路面的破坏几乎完全是由重型车辆造成的,车轴对路面的破坏力随着重量的增加而迅速增加,增加速度大约按照4次方级数递增。即重量增加1倍,破坏系数将增加16倍。因此本文拟以路基高度为0.5 m的高速公路为例,主要考虑重型车辆引起的路基的残余变形,以整车的汽-20级、挂-100级和挂-120级的车辆荷载为例研究车辆荷载与软土地基沉降量的关系。

3 软土地基在循环荷载作用下累积变形的规律

(1) 试验方案

由于交通荷载作用时间较短,路基处于不排水状况,故主要考虑不排水条件下路基的累积变形特性。试验采用频率为2 Hz的单向正弦应力代替交通

荷载,对任一试样只施加一级动荷载,对进入强化阶段的试样,动荷载作用次数取5—10万次.试验土样取自宁波,其常规指标如表3所示,试样在50 kPa围压下进行等压固结,施加的动荷载幅值分别为8、15、20 kPa,试验中以试样累积塑性变形达15%作为破坏标准.

表3 试样的常规参数

土质分类	密度 (g/cm ³)	干密度 (g/cm ³)	含水量 (%)	抗剪强度 (kPa)
软粘土	1.75	1.49	24.5	14.5

(2) 试验结果及分析

饱和软粘土在往复荷载作用下的的变形分为两部分,即弹性变形和塑性变形.试样的累积变形与加载次数的关系如图4所示.由图中可以看出,随着加载次数的增加,应变值不断增大,在动荷载幅值不大的情况下,变形逐渐趋于稳定.

定义循环应力比为

$$r = \tau_d / \tau \tag{2}$$

式中: $\tau_d = \sigma_d / 2$, σ_d 为动荷载幅值;

τ 为土体的不排水抗剪强度.

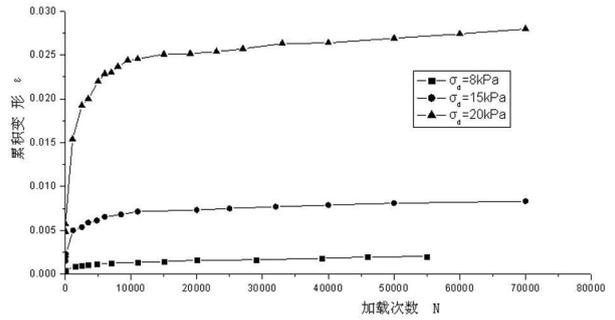


图4 残余变形与加载次数的关系曲线

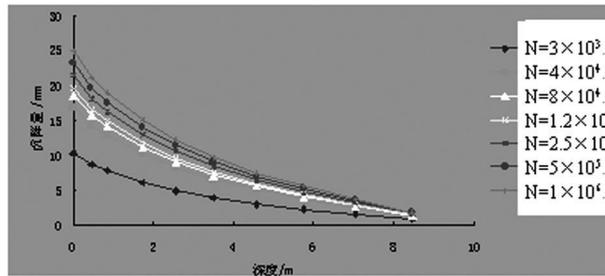
通过对试验数据的拟合分析,得到试样的残余变形与循环应力比和加载次数的关系为:

$$\begin{aligned} \epsilon = & (0.222 r^2 - 0.0149 r + 0.0026) \ln N \\ & - 0.0246 r^2 + 0.0166 r - 0.0033 \end{aligned} \tag{3}$$

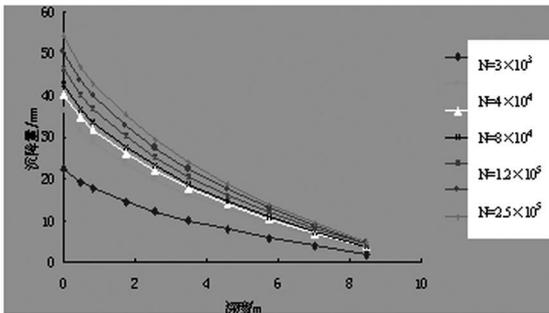
式中: $\epsilon \geq 0$, 循环应力比 $r < 0.7$.

4 计算结果及分析

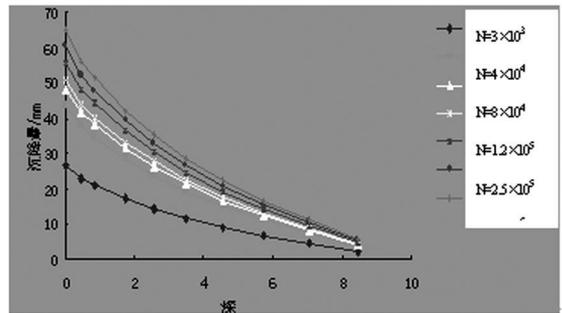
通过对单个交通荷载作用下路面结构体系的数值模拟,得到时程中最大循环应力比的分布,然后根据式(3)即可计算不同加载次数下软土地基的残余



a. 汽 - 20 级



b. 挂 - 100 级



c. 挂 - 120 级

图5 不同交通荷载作用下路基沉降沿深度的分布

变量量. 计算结果表明,在汽-20级车辆荷载作用下,后轴的车轮作用点的沉降量最大;在挂-100级和挂-120级的车辆荷载作用下,中间车轴的中点的沉降量最大,因此本文拟通过计算经过沉降量最

大点且平行于 y 轴的直线上地基土各点的残余变形来研究不同类型交通荷载引起的路面的沉降.

(1) 残余变形沿深度的分布

图5分别为汽-20级、挂-100级和挂-120级

的车辆荷载作用下地基土的沉降与深度的关系. 由图可见车辆荷载对地基土沉降量在深度上的分布具有很大影响.

在相同的路面及地基条件, 相同的荷载循环作用下, 不同车辆荷载的影响深度不同. 假设以沉降量达到 5 mm 作为荷载对地基沉降的影响深度的标准, 在循环次数为 3 000 次时, 汽-20 级、挂-100 级和挂-120 级的车辆荷载的影响深度分别为 2.56 m、6.12 m 和 6.95 m.

在相同的路面及地基条件, 相同的荷载循环作用下, 不同车辆荷载在地基同一深度引起的沉降量不同. 在循环次数为 3 000 次时, 汽-20 级、挂-100 级和挂-120 级的车辆荷载作用下, 地基表面的残余变形量分别为 9.85 mm、20.97 mm 和 27.93 mm; 地基深度为 2 m 处的残余变形量分别为 4.37 mm、12.05 mm 和 17.04 mm.

(2) 残余变形随荷载循环次数的发展

图 6 为汽-20 级、挂-100 级和挂-120 级三种车辆荷载作用下, 地基表面的沉降量与车辆荷载循环作用次数的关系曲线.

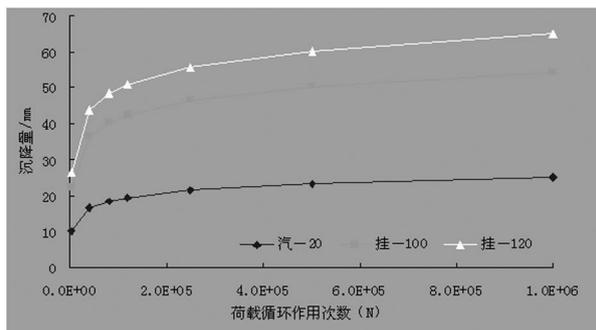


图 6 地基表面的沉降量与荷载循环作用次数的关系曲线

由图可见, 在路面上作用不同的车辆循环荷载, 地基表面的沉降量均随循环次数增加而不断增大, 但循环次数不同, 沉降量增大的速度也不同, 开始时地表沉降量随循环次数增加较快, 随荷载循环作用次数增加, 地基表面沉降量增大逐渐减缓. 考虑到路面材料的破坏疲劳次数为 1×10^6 次左右, 路面在汽-20 级、挂-100 级和挂-120 级三种车辆荷载循环作用 1×10^6 次时, 地基表面残余变形量可达 24.05 mm、53.28 mm 和 65.66 mm.

图 7 为冲击点荷载大小与地基表面的沉降量的关系曲线. 由图可见, 车辆荷载与地基表面沉降量近似符合线性关系; 而且随荷载循环作用次数不同, 车辆荷载与地基表面的沉降的影响程也不同. 将车辆

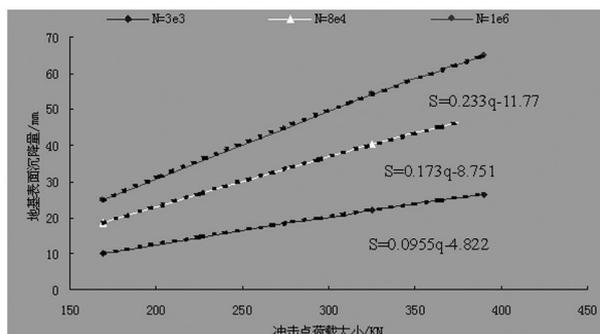


图 7 地基表面的沉降量与冲击点荷载的关系曲线

荷载与地基表面沉降量简化为线性关系, 随荷载循环次数增加, 车辆荷载与地基表面沉降量的近似直线的斜率逐渐变大, 原因在于路面结构层具有较大的刚度, 车辆荷载作用于路面, 通过路面结构和路基传递到地基, 车辆荷载在地基土中引起的附加应力很小, 其造成的地基的残余变形主要是地基土颗粒间的孔隙的压缩而非土骨架的塑性应变, 而土颗粒间的孔隙的压缩量基本与土体中的应力水平成线性关系.

5 结论

由以上分析可以看出, 交通荷载的幅值对软土路基残余变形的影响较大. 不同等级的公路都有相应的荷载标准, 如果长期超负荷运转, 其变形将会积累, 从而导致公路的破坏. 公路投入运营的早期, 在交通荷载作用下, 路面的沉降速度发展较快, 而后逐渐趋于稳定. 因此对于高等级的公路, 宜先试运营一段时间, 而后铺设高等级的路面材料, 从而提高路面的耐久性.

参考文献:

- [1] 日本道路协会编, 蔡思捷译, 道路土工—软土地基处理技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 1989.
- [2] 陈杰, 公路路面动态特性分析方法[J]. 华东公路, 2001, 24(4): 23—30.
- [3] 凌建明, 王伟, 等, 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, 2002, 30(11): 1315—1320.
- [4] 沙爱民, 江晓霞, 路面动态特性分析[J]. 交通运输工程学报, 2001, 1(2): 63—67.
- [5] R. W. Clough, J. Penzien, Dynamics of structures[M]. McGraw-Hill Inc. 1975.
- [6] 姚祖康, 道路路基和路面工程[M]. 上海: 同济大学出版社, 1993.

Study on Residual Deformation of Soft Foundation under Vehicle Load

GENG Da-xin¹, ZHONG Cai-gen², ZHENG Ming-xin¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013;

2. Geotechnical Department, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: 3D numerical simulation is adopted to analyze the dynamic response of highway under single loading circle, and to calculate the stress in the roadbed. By a series of triaxial dynamic tests, the relation between residual deformation of soft soil and numbers of loading cycles is proposed. On the basis of the above studies, a method is set up to calculate the residual deformation of soft foundation under vehicle load, and road surface settlements under different vehicle load are analyzed.

Key words: vehicle load; soft road foundation; residual deformation

(上接第 32 页)

[4] CEB—FIP Model Code for Concrete Structures 1990. Comité Euro—International du Béton/ Fédération International de la Précontrainte[M]. Paris, 1990.

[5] ACI Committee 209. Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures (209R—92) [M]. America Concrete Institute. Farmington Hills, Mich., 1992.

[6] 铁道部专业设计院. 秦沈客运专线无碴后张法预应力混

凝土箱梁(24m)技术设计阶段“设计说明书”[R]. 北京: 1999.

[7] Hu D, Tang M, Chen Z Q. The Restraint Influence Coefficient Method to Analyze Shrinkage and Creep in PC Bridges. The 8th Int. Symp. on Strut. Eng. for Young Experts, August, Xi'an, 2004, 208—213.

[8] 胡狄, 陈政清. 预应力混凝土桥梁收缩与徐变变形试验研究[J]. 土木工程学报, 2003, 8: 79—85.

Research on Similarity Relationship for Model—based Creep Experiment of Prestressed Concrete Bridges

SHI Ting-feng¹, HU Di², CHEN Zheng-qing³

(1. Guangzhou Port Group LTD, Guangzhou, 510700; 2. School of Architecture and Civil Engineering,

Central South University, Changsha 410075; 3. School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: After discussing the major factors affecting model—based creep experiment and the rules to dispose in designing experimental model, the needed similarity relationship for constructing models is presented, then the similarity relationship of cambers due to creep between model and original is put forward based on creep expression in CEB—FIP Model Code 1990. The comparison between deduced values from experimental data and tested resultants in original bridges shows that deduced values hold agreeable precision. This paper provides novel train of thought to model—based creep experiment while adopting non—full dimension model, and the established formulae are useful in engineering research.

Key words: bridge; prestressed concrete; creep; model—based experiment; similarity relationship