

# 黏质路基土永久变形改进计算方法

李冬雪, 凌建明, 钱劲松, 王海林

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

**摘要:** 通过室内重复荷载三轴试验, 测试了 36 种工况下黏质路基土永久应变与试验加载次数之间的关系; 采用统计回归的方法对黏质路基土永久变形预估模型进行了标定与修正。以分层应变总和法为基础, 结合道路渠化交通的考虑, 提出了分条分层总和法作为柔性路面路基土在车辆重复荷载作用下永久变形的改进计算方法, 并详细说明该方法的计算原理及步骤。结合典型柔性路面结构实例, 计算了黏质路基土的永久变形量, 并通过对比分析, 验证了该方法的合理性。

**关键词:** 柔性路面; 黏质路基土; 永久变形; 分条分层总和法

**中图分类号:** U 416.1

**文献标志码:** A

## Improved Calculation Method of Permanent Deformation for Cohesive Subgrade Soil

LI Dongxue, LING Jianming, QIAN Jinsong, WANG Hailin

(Key laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** The paper presents a study on permanent deformation characteristics of clayed subgrade soils on the basis of the repeated load triaxial test. The relationship between permanent strain and loading times was tested through 36 working conditions. A prediction model for permanent deformation of cohesive subgrade soils is established by improving and calibrating AASHTO 2002 model. With a consideration of the highly channelized road traffic, the itemize and layerwise summation method is proposed on the basis of the layerwise summation method as the improved method to calculate permanent deformation of cohesive subgrade soil under vehicle repeated load, calculation principle and steps of the proposed method were explained in detail. Based on a case study of a typical asphalt pavement structure, permanent deformation of clayed subgrade soils is calculated, and a comparative study verifies the rationality of this method.

**Key words:** flexible pavement; cohesive subgrade soils; permanent deformation; itemize and layerwise summation method

路面结构在重复荷载作用下产生的过量(塑性)变形累积, 会使路表面出现影响行车安全和舒适的不平整度(车辙), 或者导致面层底面因出现过大的拉应力(或拉应变)而加速疲劳破坏。在路面结构总变形中, 土基的变形占很大部分, 约为 70%~95%<sup>[1]</sup>, 路基土的塑性变形累积更是不可逆的永久变形。因此, 无论从行车安全性亦或是道路建设技术要求角度来看, 对路基土变形的研究, 特别是永久变形的研究显得十分必要。

计算路基土永久变形最常用的方法是基于力学—经验法的分层应变总和法<sup>[2-6]</sup>, 其计算方法是: 首先, 确定路基土工作区深度, 并划分亚层, 然后, 利用路面力学计算程序计算各亚层中点处的弹性应变平均值, 最后利用路基土永久变形预估公式将计算得到的弹性应变转化为塑性应变, 并叠加起来得到路基土的总塑性变形量, 其计算公式为

$$\delta_p(N) = \sum_{i=1}^n [\epsilon_{pi}(N) h_i] \quad (1)$$

式中:  $\delta_p(N)$  为轮载  $p$  重复作用  $N$  次时路基土总的永久变形;  $\epsilon_{pi}(N)$  为第  $i$  分层土的永久变形;  $n$  为路基土的分层数;  $h_i$  为第  $i$  分层厚度。

这种方法的不足在于: 仅能计算轮隙中心处路基土的永久变形, 并以该永久变形值作为路基永久变形; 即假定车轮作用在道路表面各点的概率一致。然而, 高速公路多采取渠化交通以保证车辆的迅速流动, 即车辆荷载在道路横断面上并不是等概率分布, 而是不均匀横向分布于行车道上, 因此路基中并不存在所谓的“代表计算点”, 此差异导致了计算结

收稿日期: 2012-03-20

基金项目: 国家“八六三”高技术研究发展计划(2012AA112505); 国家自然科学基金(50908176); 交通运输部西部交通建设科技项目(2010318822003)

第一作者: 李冬雪(1983—), 女, 博士生, 主要研究方向为路基工程。E-mail: dongxuebest@163.com

通讯作者: 钱劲松(1980—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为道路与机场工程。E-mail: qjs1001@126.com

果存在着一定的误差。

本文以力学-经验法和分层应变总和法为基础,结合道路渠化交通的考虑,提出了更符合实际道路使用状况的综合考虑轮迹横向分布频率的分条分层总和用于对路基土的永久变形进行计算。

## 1 路基土永久变形预估模型

近20年来,国外很多研究人员都进行了路基土永久变形的研究并建立了自己的预估模型,这些预估模型归纳起来主要有:统计法、理论法和力学经验法等<sup>[7-8]</sup>。目前,针对我国公路常用路基土永久变形预估模型的研究还处于探索阶段,文献[2]中以9个工况对Tseng-Lytton模型进行了改进和标定,建立了粘性路基土的永久变形预估模型。为了获得更高拟合精度的预估模型,本文采用36个工况进行预估模型的建立,以AASHTO(American Association of State Highway and Transportation Officials)2002模型<sup>[9]</sup>形式为基础进行路基土永久变形预估模型的研究。

根据室内重复荷载三轴试验结果绘制了不同偏

应力水平时永久变形与加载次数之间的关系曲线(图1),其余各种工况下的永久变形曲线形式与图1类似。

$$\frac{\epsilon_p(N)}{\epsilon_e} = \left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon_r}\right) \cdot e^{-\left(\frac{N}{N_0}\right)^\beta} \quad (2)$$

式中: $\epsilon_p(N)$ 为轮载 $P$ 重复作用 $N$ 次时路基土的塑性应变; $\epsilon_e$ 为路基土的弹性应变; $\epsilon_0$ 、 $\beta$ 、 $\rho$ 为材料参数; $\epsilon_r$ 为测定材料参数时所施加的回弹应变。

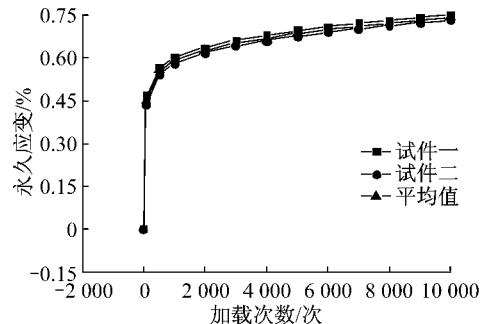


图1 永久变形曲线图(48-18-14-96)

Fig.1 Permanent deformation curves(48-18-14-96)

利用统计回归方法结合式(2)的形式,对不同工况下的室内试验曲线进行拟合,拟合数据见表1,由表1可以看出,曲线拟合相关系数很高,均大于0.7。

表1 永久变形曲线拟合数据

Tab.1 Permanent deformation curve fitting data

工况	$(\epsilon_0/\epsilon_r)\epsilon_e$	$\rho$	$\beta$	$R^2$	工况	$(\epsilon_0/\epsilon_r)\epsilon_e$	$\rho$	$\beta$	$R^2$
14-18-14-93	0.396	96.986	0.563	0.837	14-18-16-96	0.215	96.918	1.618	0.929
14-48-14-93	0.259	96.992	1.104	0.916	14-48-16-96	0.240	96.914	1.357	0.847
28-18-14-93	0.691	96.982	0.171	0.779	28-18-16-96	0.838	96.909	0.600	0.805
28-48-14-93	0.614	96.990	0.902	0.822	28-48-16-96	1.025	96.901	0.164	0.749
48-18-14-93	0.653	96.987	0.596	0.788	48-18-16-96	0.955	96.911	0.750	0.813
48-48-14-93	0.661	96.991	0.949	0.840	48-48-16-96	1.164	96.908	0.166	0.716
14-18-14-96	0.218	96.993	1.098	0.830	14-18-18-93	0.177	96.961	2.813	0.924
14-48-14-96	0.302	96.991	0.887	0.805	14-48-18-93	0.212	96.922	1.393	0.924
28-18-14-96	0.522	96.991	0.881	0.834	28-18-18-93	1.046	96.934	0.164	0.784
28-48-14-96	0.652	96.981	0.183	0.797	28-48-18-93	0.956	96.935	0.166	0.788
48-18-14-96	0.694	96.989	0.656	0.800	48-18-18-93	1.051	96.941	0.177	0.844
48-48-14-96	0.747	96.901	0.751	0.702	48-48-18-93	1.081	96.950	0.889	0.860
14-18-16-93	0.413	96.900	0.636	0.702	14-18-18-96	0.500	96.945	0.918	0.893
14-48-16-93	0.438	96.897	0.202	0.812	14-48-18-96	0.406	96.951	1.115	0.856
28-18-16-93	0.711	96.901	0.635	0.824	28-18-18-96	1.478	96.950	1.126	0.918
28-48-16-93	0.667	96.902	0.781	0.835	28-48-18-96	0.690	96.945	0.644	0.846
48-18-16-93	1.069	96.901	0.590	0.837	48-18-18-96	0.976	96.938	0.192	0.846
48-48-16-93	0.945	96.899	0.178	0.758	48-48-18-96	1.028	96.946	0.782	0.831

注:工况“14-18-14-93”指“偏应力-围压-含水率-压实度”,其余同。

AASHTO 2002 模型中,已经引入了回弹应变参数,回弹应变与偏应力具有比例关系,同时也与体积应力具有间接的联系。为了简化模型形式、方便工程应用,在模型系数回归公式中不必出现偏应力和体积应力,可以仅对反应路基土特性的含水量和回弹模量进行回归<sup>[2]</sup>。通过回归得到模型系数与材料

参数之间的关系如下:

$$\begin{cases} \log\left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon_r}\right) = 2.64929 - 0.01163W_c - 0.03713M_r \\ \log \rho = 1.98743 - 5.4 \times 10^{-5}W_c - 1.7 \times 10^{-6}M_r \\ \log \beta = 0.07637 - 0.02778W_c + 0.00202M_r \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $w_c$  为路基土的含水率, %;  $M_r$  为路基土的回弹模量, MPa.

## 2 路基土永久变形改进计算方法

### 2.1 基本原理

分条分层总和法的基本原理: 在分层总和法的基础上, 将行车道横向范围根据轮载作用宽度分为若干条带, 并将标准轴载累积作用次数按照一定的轮迹分布频率分配到各个条带上; 先求在某单个条带上作用轮载时路基土压缩层范围内亚层的压缩量  $\delta_{ij}$  (轮载作用在  $j$  条带上, 在路基土第  $i$  亚层上产生的塑性变形), 然后将各亚层压缩量累加起来 (分层总和), 即为  $N$  次荷载作用于某条带上时, 路基中所产生的压缩量; 再将各个条带上分别作用轮载时路基土总压缩量累加起来 (分条分层总和). 基本假定: 认为路基的总压缩量为各分层土竖向压缩量之和; 假定路基土只在竖向发生压缩变形, 没有侧向变形; 计算相邻荷载对本分条带压缩量的影响时, 将相邻荷载在其他分条下各亚层深度处引起的附加应力 (应变) 叠加到本条带引起的附加应力中一并计算.

### 2.2 计算步骤

#### (1) 分条与轮迹横向分布系数

在非混合行驶的单行车道上, 通过实测交通量得到的轮迹横向分布规律一般为双峰型, 如图2所示. 根据轮迹宽度 (双轮组每个轮宽 20 cm, 轮隙宽 10 cm), 将单条条带宽度  $l_i$  取为 0.5 m, 以公式:  $m = L/l_i$  计算分条数目, 其中  $L$  为行车道宽度. 每条带覆盖频率即为条带  $i$  的轮迹横向分布系数  $f_i$ , %.

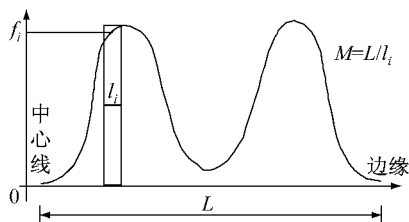


图2 轮迹横向分布频率曲线示意图

Fig.2 Sketch map of transverse distribution curve of the wheel track

#### (2) 轴载作用次数

将设计车道标准轴载累计所用次数  $N_e$  乘以条带的轮迹横向分布系数得到该条带的轮载作用次数  $N$ , 作为该条带上实际所受到的轮载作用次数, 即

$$N = N_e \cdot f_i \quad (4)$$

#### (3) 转换系数

根据预估方程中参数、粉质黏性土的含水率、回弹模量的计算公式分别按式(5)计算各个条带的转换系数  $T$ , 式中符号意义同前:

$$T = \left( \frac{\epsilon_0}{\epsilon_r} \right) \cdot e^{-\left( \frac{p}{N} \right)^p} \quad (5)$$

#### (4) 确定路基工作区深度

按照式(6)计算路基工作区深度, 然后沿深度方向将路基划分为若干个亚层:

$$Z_a = \sqrt[3]{\frac{Knp}{r}} \quad (6)$$

式中:  $Z_a$  为路基工作区深度, m;  $p$  为侧车轮荷载, kN;  $r$  为土的重度,  $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $K$  为系数, 取 0.5;  $n$  为系数, 取 5~10.

#### (5) 计算路基中各亚层弹性应变

将给定路面结构进行力学分析, 通过路面力学计算程序计算各亚层中点处的弹性应变平均值.

(6) 将各亚层平均弹性应变值以及相应的转换系数代入路基土永久变形预估模型, 计算各亚层的塑性压应变值, 乘以亚层厚度即为该亚层的永久变形量.

(7) 对路基工作区深度范围内各亚层土的永久变形量进行叠加, 即得到单条路基承受轮载作用  $N$  次时的永久变形, 即:

$$\delta_p^j(N) = \sum_{i=1}^n [\epsilon_{pi}(N) h_i] \quad (7)$$

式中:  $\delta_p^j(N)$  为在第  $j$  条带上轮载  $p$  重复作用  $N$  次时路基土总的永久变形;  $\epsilon_{pi}(N)$  为第  $i$  亚层土的永久应变;  $n$  为路基的亚层数;  $h_i$  为第  $i$  亚层厚度.

(8) 将各个条带上作用轮载时路基总压缩量累加起来, 即可得到轮载  $p$  重复作用  $N$  次时路基总的永久变形  $\delta_p(N)$  为

$$\delta_p(N) = \sum_{j=1}^m \delta_p^j(N) \quad (8)$$

## 3 算例分析

本算例中选取两组路面结构组合, 面层材料为沥青混合料, 厚度 0.18 m, 回弹模量 1 200 MPa, 基层分别为无机结合料基层 (A 组) 和粒料基层 (B 组), 厚度为 0.4 m, 回弹模量分别为 1 400 MPa 和 600 MPa, 底基层为级配碎石, 厚度为 0.30 m, 模量为 600 MPa. 路基填料为粉质黏土, 最大干密度为  $1.81 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 土基含水率为 14%, 回弹模量为 50 MPa. 车辆荷载采用《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2006) 建议的标准轴载 (单轴双轮 100 kN), 轴

载作用次数为  $2.0 \times 10^7$  次,采用上述分条分层总和法计算单向双车道路基永久变形量。

图3所示为3.75 m宽的车道上实测到的轮迹横向分布频率曲线<sup>[1]</sup>。根据前述方法将每条行车道分为8条(其中靠近中心线处为0.25 m宽,其余7条为0.5 m宽),分条情况如图4所示;并计算各条带上的轴载作用次数  $N$  及换算系数,见表2。

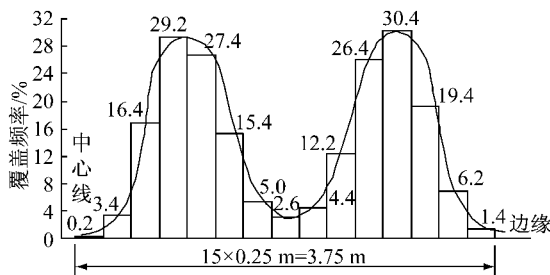


图3 单向行驶时一个车道内的轮迹横向分布频率曲线<sup>[1]</sup>

Fig.3 Transverse distribution curve of the wheel track<sup>[1]</sup> (single lane)

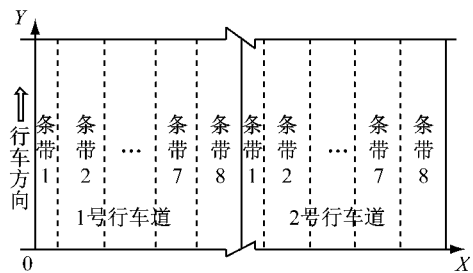


图4 行车道条带划分图(双车道)

Fig.4 The carriageways strip division(double lanes)

按照式(6)计算,路基工作区深度为2.26 m,取路基部分计算深度为2.0 m。可将2.0 m分为20个层厚为10 cm的亚层,再分别计算每层永久变形量。

将给定路面结构进行力学分析,通过路面力学计算程序计算各亚层中点处的弹性应变平均值。利用黏质土的永久变形预估式(3),将路面力学分析得到的各亚层中点处的弹性应变转化为各亚层中点处的塑性应变,乘以亚层厚度即为该亚层的永久变形

表2 考虑横向分布系数时轴载作用次数及转换系数

Tab.2 Axle load times and transform coefficient with a consideration of the transverse distribution coefficients

	条带1	条带2	条带3	条带4	条带5	条带6	条带7	条带8
分布系数 $f_i$	0.002	0.198	0.566	0.204	0.07	0.386	0.498	0.076
$N$ /万次	4.0	396.0	1 133.2	408.0	140.0	772.0	996.0	152.0
$T$	4.161 35	4.259 24	4.262 22	4.259 35	4.253 65	4.261 35	4.261 95	4.254 23

注:例:条带8的分布系数  $f_8 = 6.2\% + 1.4\% = 7.6\% = 0.076$

量;对路基工作区深度范围内各亚层土的永久变形量进行叠加,即得到单条路基承受轮载作用  $N$  次时的永久变形。例如,A组路面结构组合,荷载作用在条带2上时,计算  $X=0$  点处路基土的永久变形量,其转换系数  $T=4.259 24$ ,该点处由条带2上的荷载所引起的路基土永久变形量为0.579 mm;若为B组路面结构,同一位置路基永久变形量为0.678 mm。其他各条带路路基土的永久变形量计算方法相同,在此不再详述。

将轴载分别作用在条带1到条带8时的各条带永久变形量叠加起来就是该条带在轴载累积作用次数下的最终永久变形量,将路基永久变形量计算结果绘制成曲线,以路基宽度  $X$  为横坐标,路基永久变形值  $\delta_p(N)$  为纵坐标,条带1左边界点为零点,直观显示路基横向空间分布情况,如图5所示。以二次多项式模型对计算结果进行拟合,曲线拟合相关系数很高,拟合均方差均大于0.95。

为便于对比计算方法改进前后的路基永久变形计算结果,同时绘出以分层总和法计算的路基永久变形值,如图5所示。可以看出改进前计算得到的路基永久变形值与采用新方法计算结果有较大差别,

前者计算结果为一条直线,后者计算结果呈盆状曲线。将计算结果与轮迹横向分布频率曲线相对比可知,后者的计算结果更符合实际。

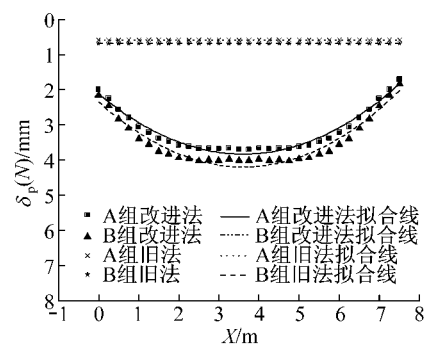


图5 路基顶面永久变形曲线

Fig.5 Permanent deformation curve of the subgrade

## 4 结论

通过室内重复加载三轴试验,修正和标定了黏质路基土永久变形预估模型。以计算路基永久变形的分层总和法为基础,提出了反应道路交通渠化影

(下转第457页)