

# 柔性路面设计及其永久变形分析

刘升传,王连俊,冯震

(北京交通大学土建学院交通与环境研究所,北京 100044)

**摘要:**该文首先介绍了路面设计的方法及其发展,还介绍了“典型结构—经验结构”法及其框架,然后对柔性路面在车辆重复轴载作用下的永久变形进行了比较详细的分析。其次介绍了采用的材料(包括 AC,粒状材料和软土路基)特性,并对反应模型进行详细介绍。最后对实验结果进行分析,得出了结论。

**关键词:**柔性路面;永久变形;设计;灵敏度分析

**中图分类号:**U416.221 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-7716(2005)02-00103-04

## 0 前言

一般柔性路面的刚度较小,抗弯拉强度较低,主要靠抗压、抗剪强度来承受车辆荷载作用,因而在荷载作用下,扩散应力的能力不如刚性路面,所产生的弯沉变形较大。因而土基可能受到较大的单位压力,土基的强度和稳定性对整个路面结构有较大影响。柔性路面的范围包括各种基层(水泥混凝土路面基层除外)和各类沥青面层、碎(砾)石面层或块石面层组成的路面结构。柔性路面设计的内容包括路面结构层组合设计,路面结构计算以及路面材料配合比设计。柔性路面的设计方法可概括分为两类:一类是以经验或实验为依据的经验法,如美国加州承载比(CBR)方法,美国陆军工兵部队(COE)设计方法,加州交通厅(CALTRAN)HVEEM设计方法和美国各州公路工作者协会(AASHTO)法;一类是以力学分析为基础,考虑环境、交通条件以及材料特性等因素的理论法。现在出现了应用非传统材料的“典型结构—经验结构”方法。CBR法使用材料圆形压头以一定速率压入土壤和高质量的碎石材料,当压入深度为0.254 cm时,二者所施加单位压力的比值即为土壤的承载比率(即 CBR 值);AASHTO法根据大量实验结果得到一系列表征路面工作状态的现时服务能力指数 PSI 和表征路面强弱的路面结构数 SN 和荷载参数之间的经验关系式和图表并用于设计;“典型结构—经验结构”法其框架的完成是向系统加入以下程序:(1)考虑 Miner 定律的疲劳开裂;(2)低温缩裂预测;(3)开发预测永久变形的力学子程序。

车辙是路面结构层及土基在车辆荷载重复作用下,导致结构层中材料的垂直和侧向位移产生的累积永久变形。车辙是柔性路面的主要破坏形式,因为这类路面的使用寿命较长,即使每一次行车荷载作用产生的残余变形量很小,而多次重复作用累积起来的残余变形总和也将会很大,足以影响车辆的正常行驶。但是在计算分析中很难模拟,主要是因为:

(1)材料间的本质关系是非线性和复杂的,大多数路面材料在重复的动荷载作用下很难去分析特点;

(2)沥青混凝土(AC)材料是粘弹性的和粘塑性的,如对强烈加载时间和温度有很强的依赖性。其他耦合材料如基层,底基层和路基与时间关系不大。

(3)材料的温度和湿度随每一次加载次数而变化。我们仍相对不同材料、结构、交通和环境条件下,对路面的车辙深度进行预测。

永久变形包括固结和剪切两部分,通常在路面设计中处理。已存的在柔性路面设计中控制车辙深度的方法是在路基顶部限制垂向变形。本文提出一种不同方法,需要的材料属性由对沥青混凝土(AC)、基础和路基材料实验结果获得,同时对分析结果进行了讨论。

## 1 材料特性

### 1.1 沥青混凝土

(1)弹性特性:通过加载频率测定的动态模量可以用来模拟交通条件,下式是在频率为 10 Hz 时的动态模量公式:

$$\log E_d = \delta + \frac{\alpha}{1 + \exp(\beta - \gamma \log f_r)} \quad (1)$$

其中, $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\delta$ 、 $\gamma$  为常量, $f_r$  为减少率。

(2)永久变形特性:累积永久变形与弹性变形

收稿日期:2004-08-03

作者简介:刘升传(1978—),男,山东人,硕士研究生,从事环境工程专业学习研究。

(EPER)的比率与重复荷载数  $N$  和温度  $T$  及应力值有关,公式为:

$$\log \frac{\epsilon_p}{\epsilon_r} = a_0(\theta) + a_1(\theta) \cdot \log\left(\frac{N}{a_T}\right) + a_2(\theta) \cdot \left[\log\left(\frac{N}{a_T}\right)\right]^2$$

$$\log a_T = -\frac{c_1[T - T_0 - f(p)]}{c_{20} + c_{21} \times \sigma_3 + T - T_0 - f(p)} \quad (2)$$

$$f(p) = c_{30} + c_{31} \cdot p$$

这里,  $a_i$  是体积应力  $\theta$  的线性函数,  $\sigma_3$  为水平应力。

分析所用的材料特性如表 1:

表 1 分析所用的材料特性

特性	AC	粒状基层	软土路基
弹性特性	$\alpha = 4.954164$		
	$\beta = -0.65693$		
	$\gamma = -0.231213$	$k_1 = 1546$	
	$\delta = 0.278879$	$k_2 = 1.209$	
	$c_1 = 7.93177$	$k_3 = -0.743$	
	$c_2 = 56.0032 + 4.532444 \times p/pa$	$k_6 = 0.055$	
永久变形特性	$c_3 = 20.28316 - 0.58904 \times p/pa$		
	$c_4 = 0.00007505$		
	$a_0 = -1.34891 + 0.040254 \times \theta/pa$	$a_0 = -0.01891$	
	$a_1 = -0.877026 - 0.02523 \times \theta/pa$	$a_1 = -0.2514$	
	$a_2 = -0.04395 + 0.000487 \times \theta/pa$	$a_2 = 0.358983$	
	$c_1 = -5.50313$	$b_0 = 0.310932$	$a_0 = -1.38164$
	$c_{20} = -60.5755$	$b_1 = -0.072703$	$b_0 = 0.324655$
	$c_{21} = 1156.425$	$b_2 = 0.098332$	
	$c_{30} = 0.035212$		
	$c_{31} = -0.67043$		

1.2 粒状材料

(1)弹性特性:弹性模量是体积  $\theta$  和八面体剪切应力  $\tau_{oct}$  的函数,如下式:

$$\log E_r = k_1 pa \times \left(\frac{\theta + k_6}{pa}\right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{pa}\right)^{k_3} \quad (3)$$

其中,  $k_i$  为常数,  $pa$  为大气压。

(2)永久变形特性:

累积永久变形与弹性变形(EPER)的比率是体积和八面体剪切应力的函数:

$$\log \frac{\epsilon_p}{\epsilon_r} = \left[ a_0 + a_1 \left(\frac{\theta + k_6}{pa}\right) + a_2 \left(\frac{\tau_{oct}}{pa}\right) \right] + \left[ b_0 + b_1 \left(\frac{\theta + k_6}{pa}\right) + b_2 \left(\frac{\tau_{oct}}{pa}\right) \right] \cdot \log N \quad (4)$$

其中,  $a_i$  和  $b_i$  为常数。

1.3 软土路基

其弹性模量为常数。累积永久变形与弹性变形(EPER)的比率为:

$$\log \frac{\epsilon_p}{\epsilon_r} = a_0 + b_0 \cdot \log N \quad (5)$$

其中,  $a_0$  和  $b_0$  为常数。

2 主要反应模型

路面与应力和变形的影响关系应用多维线弹性

计算机程序可以计算得到。路面平均分为 20 层,每一层的起始模量和应力位置已确定。如图 1 所示。计算机计算每个子层上的所有点的应力值,然后取应力值平均值得到每一层的新的模量值。计算机将对计算值进行叠代运算,直到连续两个值的误差小于 0.01%。

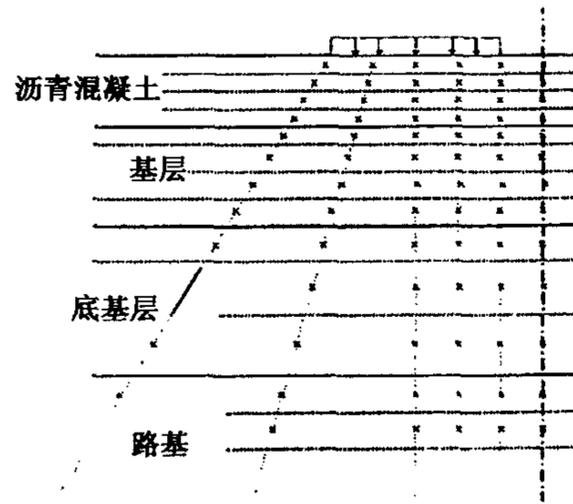


图 1 路面子层结构和计算点位置

每个阶段程序会计算在加载条件和卸载条件( $\alpha = 0$ )的表面变形,加载条件为( $N = 100000, 10000, 1000, 100$  和  $10$ )。用加载时的变形量减去卸载时的变形量,从而计算出车辙率(即每次重复荷载的路面变形增量)。车辙率  $RP$  与重复荷载数目  $N$  的关系式为:

$$\log(RR) = a_0 + a_1 \log(N) \quad \text{或}$$

$$RR = a_0 + a_1 \exp[a_2 \ln(N)] \quad (6)$$

3 结果分析

永久变形与车辆荷载作用轴次关系最初是由 Monismith 等人于 1975 年提出的,如式 6 所示:  $\epsilon_p = AN^b$ , 其中,  $\epsilon_p$  为累积永久应变,%;  $N$  为作用轴次;  $A, b$  为回归参数。

这次试验主要包括灵敏度分析和设计程序验证。灵敏度分析包括路基顶部分层数目和设计荷载,为了减少计算时间但又不影响结果的可靠性,我们采用了 Israeli 柔性路面设计方法,在软土路基上采用 13 t 单轴荷载重复加载 500000 次,采用表 1 的材料特性参数,路面是由 100 mm AC, 200 mm 基层和 350 mm 底基层构成,每层又分别分为 4, 5, 6 层。同时假定基层和底基层的性质相同,然后分别计算一年时间内在白天上午 5 点到晚上 10 点间的路面表面层深度分别为 25.4 mm, 50.8 mm, 76.2 mm 和 101.6 mm 各层的每小时温度,得到 48 个温度大于 20 °C 的温度带,如图 2 所示为温度分布图。图 2 中每个时期有不同数目,其总数目等于路面温

度大于 20 °C 的数。图 3 表示了卸载条件下的计算模量。

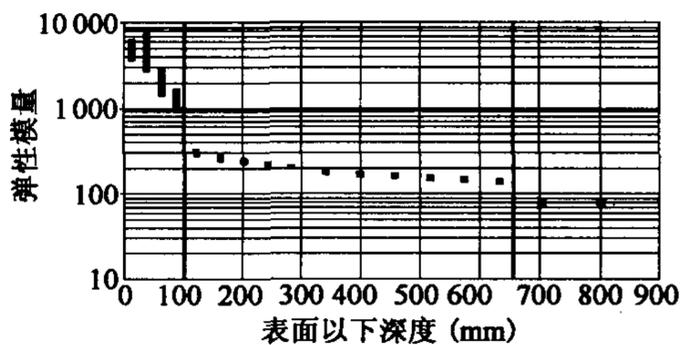


图2 弹性模量变化

从图 2 可以看出，AC 层的沥青由于材料原因，其动态模量对水平应力表现得很敏感，AC 层上半部分的弹性模量值达到约 5 000 MPa，而下半部分约为 1 400 MPa；并且由于压应力到处存在，因此即使上层温度很高，其弹性模量仍很大；由于轮缘底存在很大的剪应力，可导致不稳定的 AC 材料发生流动。粒状材料的弹性模量随深度单调下降，在底基层的底部，其模量是路基模量的两倍。

在进行路面结构分析中，对路基顶部分为 2 到 4 层，从计算结果来看，路面永久变形与路基顶部的分层数目关系不大，这是因为分析所用的软土具有相当的硬度，因此路基的应力级别很低，从而对变形影响大。另外实验发现，单轴荷载为 13 t 重复加载次数为 262 000 时，需要更厚的路面（为 610 mm，而 11 t 和 15 t 分别为 560 mm 和 590 mm），因此可将其作为设计荷载。图 4 表示在客货混合运输条件下三种轴荷载引起的永久变形，从图中可以看出：(1) 13 t 单轴荷载引起的永久变形比其他两种荷载引起的变形更大，证明了将其作为设计荷载的合理性；(2) 客货混合运输条件引起的累积表面永久变形曲线与设计荷载 13 t 的变形曲线相同，因此用 13 t 荷载作为试验荷载可以减少计算时间而又不影响结果精度；(3) 设计周期内引起的累积表面永久变形为 14 mm，这个结果不包括交通条件等的影响。

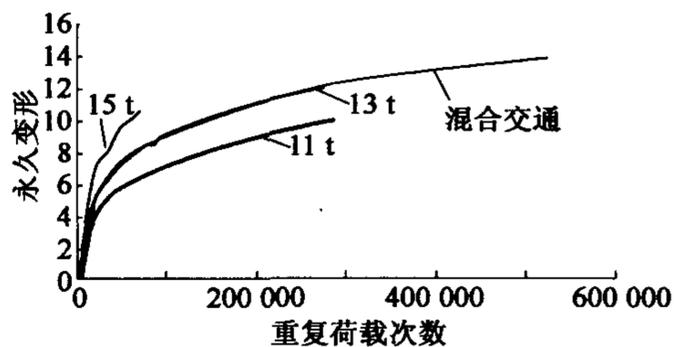


图3 不同轴荷载下的永久变形

那么，路面永久变形与沥青混合料(AC)的厚度及材料特性有什么关系呢？是不是其厚度越厚永久变形就越小呢？对于不稳定材料来说，沥青混合料

(AC)只有 70 mm 承受高的剪应力。但是沥青混合料(AC)的分层数又确实影响永久变形。为表述他们三者之间的关系，如图 4 所示，曲线 1 和曲线 2 分别为粒状材料厚度不变条件下，AC 厚度分别为 100 mm 和 190 mm 时的累积永久变形。很明显可以看出，变形从约 14 mm 降为不到 11 mm；现增加 AC 层厚度的同时减少粒状材料厚度(比例为 1 mm AC 等于 1.5 mm 基层)，则累积永久变形仍约为 11 mm，如曲线 3 所示，这表明 AC 层厚度对路面的永久变形起关键作用。

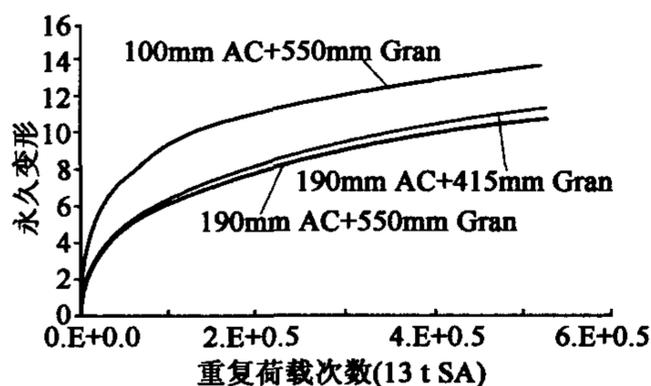


图4 不同 AC 和粒状层厚度对变形的影响

程序灵敏度的检验是用来试验交通量较大情况下的变形。图 5 显示了 13 t 单轴重复荷载的永久变形。结构构成为 580 mm 粒状基层—底层和 190 mm AC，设计使结构承受 5 000 000 次的 13 t 单轴重复荷载，相当于大约 30 000 000 次的 8.2 t 单轴重复荷载。可以看出在设计周期结束时，永久变形不到 17 mm，车辙深度不超过 10~12 mm。

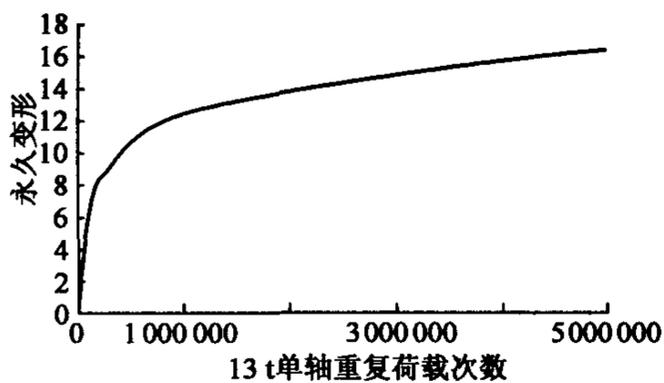


图5 5 000 000 次 13 t 单轴重复荷载下的永久变形

#### 4 结论

本文论述了应用“典型结构—经验结构”方法预测柔性路面的永久变形，主要包括以下几个方面：

(1) 路基的子层数量需要根据不同条件(如应力级别和材料引起的变形)下确定，本文所采用的软土路基由于理想的硬度和设计，因此可以分为 2 层。实际情况下需具体设计。

(2) 可以根据实验结果采用 13 t 为设计荷载，从而减少交通中的轴数量。

(3) 运用 Israeli 设计方法(CBR 方法的改进)设

# 土基填料 CBR 值内在机理及影响因素分析

张保俭, 杨广庆

(石家庄铁道学院土木工程分院, 河北石家庄 050043)

**摘要:**总结了 CBR 试验的含义、实质、试验要点, 分析了 CBR 试验的内在机理和影响因素, 并探讨了土基填料的粒径大小及矿物成分对 CBR 值的影响。

**关键词:**CBR 试验; 内在机理; 影响因素; 矿物成分

**中图分类号:**U416.03 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-7716(2005)02-0106-02

## 0 前言

加州承载比(CBR)试验是 1928 年美国加州在进行沥青路面破坏调查时, 为比较材料的强度而提出的。日本在 1970 年也将其列入国家土质试验规程。我国 1995 年发布的交通行业建设标准《公路路基设计规范》(JTJ 013-95)和《公路路基施工技术规范》(JTJ 033-95)中修订了 1986 年版本的规定, 明确将 CBR 试验作为技术要求列入规范。在此之前, JTJ 051-93《公路土工试验规程》中则规定了进行 CBR 试验的程序。目前, CBR 试验已成为评价土基和路面材料强度及稳定性的重要技术指标, 是柔性路面设计的主要依据。

## 1 CBR 试验的含义、实质

依据美国材料试验协会(ASTM)标准 D 193-93《CBR 标准试验方法》, 试验的目的是用于评估公路基层、底基层及垫层材料(最大颗粒尺寸小于 19 mm 的黏性材料)的潜在强度, 它是柔性路面设计方法的一个组成部分。

所谓 CBR(California Bearing Ratio 加州承载比)是指标准试件(材料在标准的击实层次与次数、含水量、密度)下成型后, 标准饱水 96 h 后, 进行贯入试验, 当贯入量达 2.5 mm 时的单位压力与标准

碎石压入相同贯入量时标准荷载强度的比值, 用百分数表示。它是一种评定材料承载能力的试验方法, 表征了材料抵抗局部荷载压入变形的能力, 以确保路堤填筑压实后的浸水整体强度和稳定性符合设计要求。

CBR 试验有三个要点:

(1)对象主要是黏性材料: CBR 值与材料的黏性度成反比, CBR 值越小则黏性越强。

(2)水浸泡试验是基本条件: 由于高速公路路面的封闭作用, 路基路面中聚积的水分得不到蒸发, 使路基在运营中的含水量增大。按 4 昼夜浸水作为设计状态, 模拟了路基在使用过程中可能处于的最不利状态下的强度, 有利于提高路基的强度和稳定性, 防止竣工后使用及养护过程中路基病害的发生。

(3)材料的颗粒尺寸必须加以限定。在 D 193-93 中明确规定, 试验方法适用于最大颗粒尺寸小于 19 mm 的材料。我国《公路土工试验规程》扩大了其应用范围: 承载比试验的试样最大粒径宜控制在 25 mm 以内, 最大不得超过 38 mm。

## 2 CBR 试验的内在机理

根据土力学的原理, 由土壤形成的“土体”在贯入试验中所反映的强度实质上是它的局部抗剪切强度, 并以此来间接评价地基的抗局部剪切强度。CBR 值是反映在贯入试验之后, 试件中部分土体与整体之间产生相对位移(即剪切)时, 在滑动面(即剪切面)上所产生的抗剪切力特性的表征, 是其“潜在”式表现出来。

(6)本文中所提设计思想同时可以用于高速公路其他结构层永久变形的计算以直接推求路面车辙深度。对于高速铁路以变形为设计标准的思路也有借鉴参照作用。

收稿日期: 2004-05-31

作者简介: 张保俭(1972-), 男, 河北石家庄人, 硕士, 讲师, 主要从事岩土工程教学与科研工作。

计路面可以产生可以接受的路面变形。

(4)通过用稳定材料, 提高 AC 层厚度来加强路面结构, 可以减小永久变形。

(5)永久变形不仅直接控制着柔性路面的车辙深度, 而且影响着路面开裂, 特别是以疲劳裂纹的形