

# 沥青路面结构手算设计过程研究

宋云连, 胡兵, 林敏

(内蒙古工业大学 土木工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051)

**摘要:**文章依据最新沥青路面设计规范, 参照最近出版的《路基路面工程》教材, 结合课程教学大纲要求, 考虑内蒙古工业大学目前的实际教学条件, 针对沥青路面结构设计章节, 编写了利用手算进行结构设计的详细授课内容, 包括设计中所需资料、手算设计沥青路面结构所利用的计算公式、详细设计步骤, 以及对应的设计结果。另外, 以算例的形式给出了沥青路面结构手算设计过程, 方便学生熟练掌握沥青路面结构设计的理论、依据方法、计算公式及设计结果等内容。

**关键词:**沥青路面; 结构手算设计; 教学大纲; 设计成果; 教学方法

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

文章编号: 1005-2909(2013)06-0122-05

由于公路工程技术的不断发展, 交通部在 1995 年后陆续颁布了多个规范, 如《公路沥青路面设计规范》(2006 年版) 和《水泥混凝土路面设计规范》(2011 年版) 等。但路基路面工程课程所用教材跟不上规范更新的步伐, 这就给正常的授课带来困难。为此也有一些学者对这方面的教学内容进行了探讨和研究<sup>[1-2]</sup>。因此, 文章针对新规范<sup>[3]</sup>和现有最新教材, 结合学校及教育部专业建设要求<sup>[4-5]</sup>, 对路基路面工程中沥青路面结构设计章节的授课内容进行部分增补, 便于学生在后续课程设计、毕业设计中进行手算分析。

## 一、详解沥青路面结构设计分析过程

### (一) 沥青路面设计过程简介

最新规范中沥青路面结构设计采用的方法是依据相应设计软件进行, 即把待设计路面的交通量信息、道路信息、各层材料模量、除待定层以外其他层厚度, 及设计限制(如最小设计厚度、防冻厚度等)输入程序中, 程序将自动完成路面结构设计。

### (二) 沥青路面结构设计步骤分析

从软件设计过程可知, 设计者应根据实际情况对设计结果进行适当调整, 才可设计出比较符合实际的路面结构。近期出版的相关教材中<sup>[6-7]</sup>, 也全部采用了机算设计方法。但对初学者来说, 由于对路面结构概念理解不够透彻, 对软件设计结果的恰当与否也无从判断。因此, 为了给学生讲清楚沥青路面结构设计的详细步骤, 必须把软件中的设计过程展开来分步骤、分环节地讲解, 否

收稿日期: 2013-05-21

基金项目: 内蒙古自治区 2013 年研究生自然科学基金创新项目(S20131012808); 季冻区早强水泥稳定碎石基层的路用性能试验研究(ZD201309); 内蒙古工业大学路基路面课程体系的教学改革研究(2011031)。

作者简介: 宋云连(1972-), 女, 内蒙古工业大学土木工程学院教授, 博士, 主要从事路基工程和路面工程研究, (E-mail) syllsj@imut.edu.cn。

则学生无法透彻理解设计的内涵,也不能熟练掌握沥青路面结构设计过程。为此,文章根据最新规范,结合众多参考文献和相应规范,归纳总结出如下适用于授课内容的手算设计方法。

第一步:给出待设计道路等级、沥青路面类型、面层类型、设计年限  $t$ 、车道系数  $\eta$ 。进而确定道路等级系数  $A_c$ 、面层类型系数  $A_s$  和基层类型系数  $A_b$ 。

第二步:交通量和设计弯沉的计算。根据交通量调查结果给出交通量资料:(1)道路上行驶车辆类型及其日交通量;(2)设计年限内交通量平均增长率预测值  $\gamma$ 。统计计算路面竣工后第一年平均日当量轴次  $N_1$  (次/d),计算累计交通量

$$N_e = \frac{t(1+\gamma)^t - 11 \times 365}{\gamma} N_1 \eta \quad (1)$$

依据规范,由  $N_e$  计算结果确定交通等级。

第三步:确定  $E_0$ 、 $\sigma_{ps}$ ,拟定路面结构组成方案。按照路基土类型与干湿类型,确定路基回弹模量  $E_0$ 。拟定路面结构组成层数,以及每层所用材料,实验测定或者查规范<sup>[3]</sup>确定各层材料在规定温度或龄期的劈裂强度  $\sigma_{ps}$  (MPa),及抗压回弹模量  $E_i$ 。选定待设计层,除该层外确定其余所有层厚度。

对于二级及二级以上的公路,需要进行各整体结构层层底的弯拉应力验算,为此需要确定这些层的容许弯拉应力。计算各层对应容许拉应力

$$\sigma_R = \sigma_{sp}/K_s \quad (2)$$

式中,  $K_s$  ——抗拉强度结构系数,可用下面公式求得。

对于沥青混凝土面层:

$$K_s = 0.09N_e^{0.22}/A_c \quad (3a)$$

对于无机结合料稳定集料类:

$$K_s = 0.35N_e^{0.11}/A_c \quad (3b)$$

对于无机结合料稳定细粒土类:

$$K_s = 0.45N_e^{0.11}/A_c \quad (3c)$$

第四步:计算沥青路面结构的设计弯沉  $l_d$ 。

$$l_d = 600N_e^{-0.2} A_c A_s A_b \quad (4)$$

第五步:给出限制条件并进行路面结构设计。

根据上述诸多条件,给出道路结构层最小设计厚度,以及总结构层的最小防冻厚度(对季冻区)。由设计弯沉  $l_d$  通过机算或者查诺模图求解待设计层厚度  $h_i$ 。再对所有整体结构层层底拉应力进行计算。当所有层都满足要求,即说明拟定的路面结构

合理。否则,调整设计层厚度后,重复上述步骤,直到满足要求为止。

## 二、详解沥青路面结构手算设计过程

利用手算进行沥青路面结构设计时,在交通量统计和  $N_e$  已经获得的基础上,需按照下列步骤进行。

第一步:三层体系转化。

按照弯沉等效原则要求将多层体系转换成三层体系,如图1所示。对应的具体换算公式为

$$H = \sum_{i=2}^{n-1} h_i^{2.4} \sqrt{E_i/E_2} \quad (5)$$

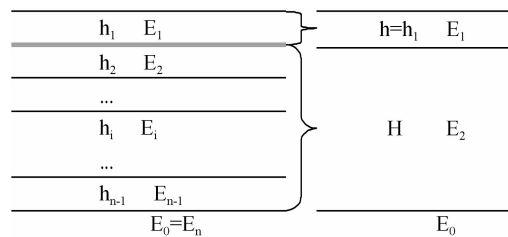


图1 路表弯沉等效的结构层换算图

第二步:综合修正系数  $F$ 。

$F$  是用来修正路表弯沉理论计算值  $l_d$  的误差。规范中定义为<sup>[3]</sup>

$$F = 1.63 \left( \frac{l_s}{2000\delta} \right)^{0.38} \left( \frac{E_0}{p} \right)^{0.36} \quad (6)$$

式中,  $l_s$  为路面实际弯沉值(0.01 mm),当由弯沉来设计路面结构厚度时,取设计弯沉  $l_d$  即可;  $p = 0.7$  MPa 为标准轴的轮胎接地压强;  $\delta = 10.65$  cm 为标准轴的当量圆半径。考虑  $F$  后弹性三层体系表面的回弹弯沉计算公式为:

$$l_s = 1000 \cdot \frac{2p\delta}{E_1} \alpha'_L F \quad (7)$$

式中,  $E_1$  (MPa) 为三层体系中面层材料回弹模量;  $\alpha'_L$  为以  $E_1$  表达时的理论弯沉系数,需通过软件程序或查表来计算。一般情况下,结构设计时上面层厚度为已知,其下某基层厚度为待定,故由上面公式转化后三层体系中层厚度  $H$  一般是未知量。故可根据三层体系弯沉系数诺模(图2),并由  $l_d$  反算三层体系中层厚度  $H$ ,然后反求待定设计层厚度  $h_i$ 。

图2中理论弯沉计算式:  $l = \frac{2p\delta}{E_1} \alpha'_L$ ,  $\alpha'_L = \alpha k_1 k_2$ , 其中  $\alpha, k_1, k_2$  3个参数可通过图中三幅小图查得。

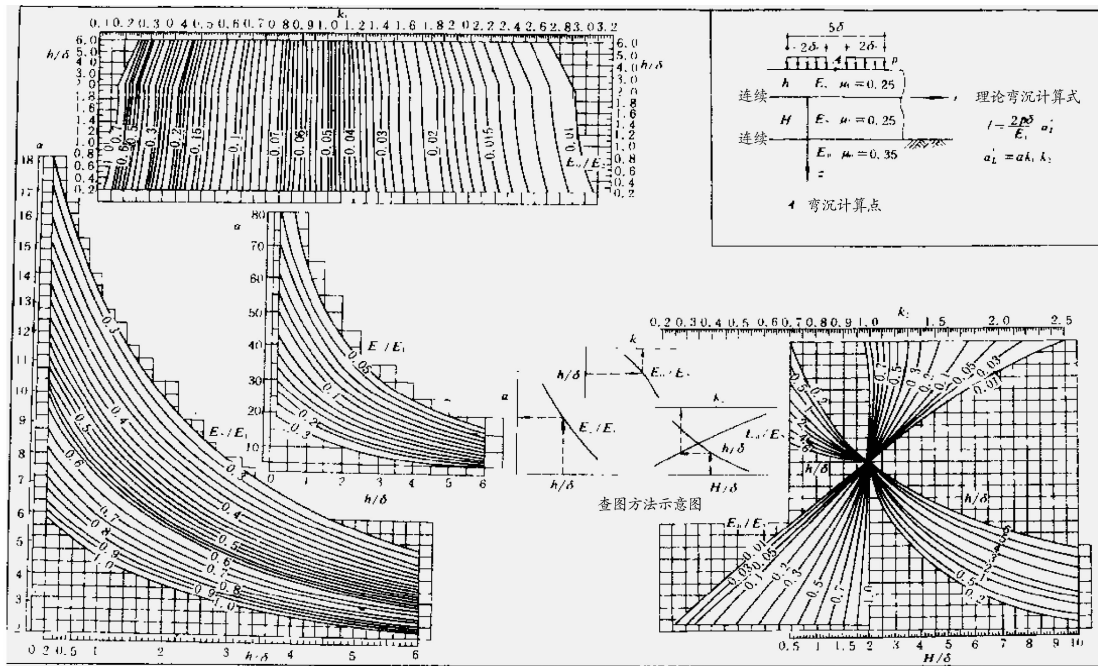


图2 三层体系表面弯沉系数诺模图

第三步:按弯拉应力等效原则进行三层体系转化。

对需要进行层底拉应力验算的结构层,需将多层体系按照弯拉应力相等原则换算为三层体系,如图3所示。

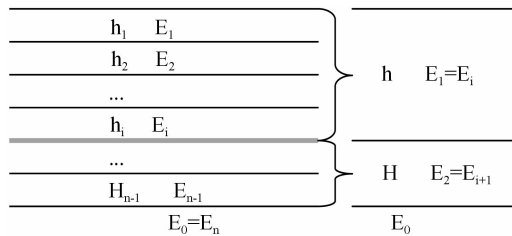


图3 上层底面弯拉应力等效换算图

当计算第*i*层底面弯拉应力时,需利用公式(8)将该层以上所有层换算为三层体系上层;用公式(9)将*i*+1层至*n*-1层换算为三层体系中层

$$h = \sum_{k=1}^i h_k \sqrt[4]{E_k/E_i} \quad (8)$$

$$H = \sum_{k=i+1}^{n-1} h_k \sqrt[4]{E_k/E_{i+1}} \quad (9)$$

假设上层和中层间为连续接触,如为滑动接触,可查阅相关文献[6]计算,方法类似。上层和中层底面最大拉应力表达式分别为

$$\sigma_{r_1} = p\bar{\sigma}_{r_1}, \sigma_{r_2} = p\bar{\sigma}_{r_2} \quad (10)$$

其中,弯拉应力系数 $\bar{\sigma}_{r_1}$ 和 $\bar{\sigma}_{r_2}$ 可由软件电算直接得到,也可以查阅诺模图。

### 三、算例分析

某一级公路宽15 m,取车道横向分布系数 $\eta = 0.4$ ,交通量平均增长率 $\gamma = 4.5\%$ ,设计年限 $t = 15$  y。路线所经地区为II<sub>2</sub>区,土质为粉质低液限粘土,根据相关规范和参考资料<sup>[3,6]</sup>,查得路基土回弹模量为31 MPa。通过分析得累计交通量为: $N_e = 750$ (万次)。

表1 路面结构材料及结构

层次	结构层名称	厚度 $h_i$ (cm)	20 °C 抗压回弹模量		$\sigma_{ps}$
			$E_i$ (MPa)	$E_i$	
1	中粒式沥青混凝土	6	1 200	1 800	1.0
2	粗粒式沥青混凝土	8	1 000	1 600	0.8
3	水泥稳定砂砾	?	1 300	3 000	0.5
4	天然砂砾	20	180	180	
5	路基土		31	31	

初步拟定路面结构及力学计算参数如表 1 所示。现利用手算计算确定待定层厚度  $h_3$  (以下所有手算结果后括号内斜体数值为软件 HPDS2011 机算结果)。

1. 设计弯沉

$$l_d = 600N_e^{-0.2}A_cA_sA_b = 600 \times 7\,500\,000^{-0.2} \times 1 \times 1 \times 1 = 600 \times 0.039\,83 = 25.5(0.01\text{ mm})(25.5)$$

2. 综合修正系数

$$F = 1.63 \left( \frac{l_s}{2\,000\delta} \right)^{0.38} \left( \frac{E_0}{p} \right)^{0.36} = 1.63 \left( \frac{25.5}{2\,000 \times 10.65} \right)^{0.38} \left( \frac{31}{0.7} \right)^{0.36} = 0.495$$

将 5 层体系简化成三层体系。由  $h_1/\delta = 0.563\,4$ ,  $E_2/E_1 = 1\,000/1\,200 = 0.833$ ,  $E_0/E_2 = 31/1\,000 = 0.031$ , 查图 4 得  $\alpha = 6.3$ ,  $k_1 = 1.3$ 。由系数  $\alpha'_L = \alpha k_1 k_2$  和式(7)得

$$k_2 = \frac{E_1 l_d}{2p\delta\alpha k_1 F} = (1\,200 \times 0.025\,5) / (2 \times 0.7 \times 10.65 \times 6.3 \times 1.3 \times 0.495) = 0.506$$

由  $k_2$  反查得  $H/\delta = 5.8$ , 即  $H = 5.8 \times 10.65 = 61.8(\text{cm})$ , 代入当量厚度换算公式(5)有

$$61.8 = 8 + h_3 \times \sqrt[2.4]{1\,300/1\,000} + 20 \times \sqrt[2.4]{180/1\,000}$$

解得  $h_3 = 39.3\text{ cm}(39.6)$ , 考虑实际施工采用水泥稳定砂砾层厚为 40 cm, 分两层施工。

3. 验算中粒式沥青混凝土上面层层底拉应力

三层体系为:下面为土基,上层为 6 cm 中粒式

沥青混凝土,中层为由第 2 层到第 4 层组成的粗粒式沥青混凝土,厚度为

$$H = \sum_{k=2}^4 h_k \sqrt[0.9]{E_k/E_2} = 8 + 40 \times \sqrt[0.9]{3\,000/1\,600} + 20 \times \sqrt[0.9]{180/1\,600} = 90.2(\text{cm})$$

抗拉强度系数  $K_s = 0.09N_e^{0.22}/A_c = 2.90$ 。容许拉应力为:  $\sigma_R = \sigma_{sp}/K_s = 1.0/2.9 = 0.344(\text{MPa})$ 。由  $h/\delta = 0.563\,4$ ,  $E_2/E_1 = 1\,600/1\,800 = 0.889$ ,  $E_0/E_2 = 31/1\,800 = 0.017$ 。查图 4 发现拉应力系数已不能从图中查到,表面层底将受压应力(或者拉应力很微小),应视为验算通过(机算结果:  $-0.128\text{ MPa}$ )。

4. 验算粗粒式沥青混凝土下面层层底拉应力

由上面两层作为上层,厚度为

$$h = \sum_{k=1}^i h_k \sqrt[4]{E_k/E_i} = 6 \times \sqrt[4]{1\,800/1\,600} + 8 = 14.2(\text{cm});$$

由水泥稳定层和砂砾层组成中层,厚度为:  $H = \sum_{k=i+1}^{n-1} h_k \sqrt[0.9]{E_k/E_{i+1}} = 40 + 20 \times \sqrt[0.9]{180/3\,000} = 40.9(\text{cm})$ 。

抗拉强度结构系数为  $K_s = 0.09N_e^{0.22}/A_c = 2.9$ ,  $\sigma_R = \sigma_{sp}/K_s = 0.275(\text{MPa})$ 。由  $h/\delta = 1.33$ ,  $E_2/E_1 = 1.875$ ,  $E_0/E_2 = 0.01$ 。查图 4 发现拉应力系数已不能从图中查到,应视为拉应力验算通过( $-0.093\text{ MPa}$ )。

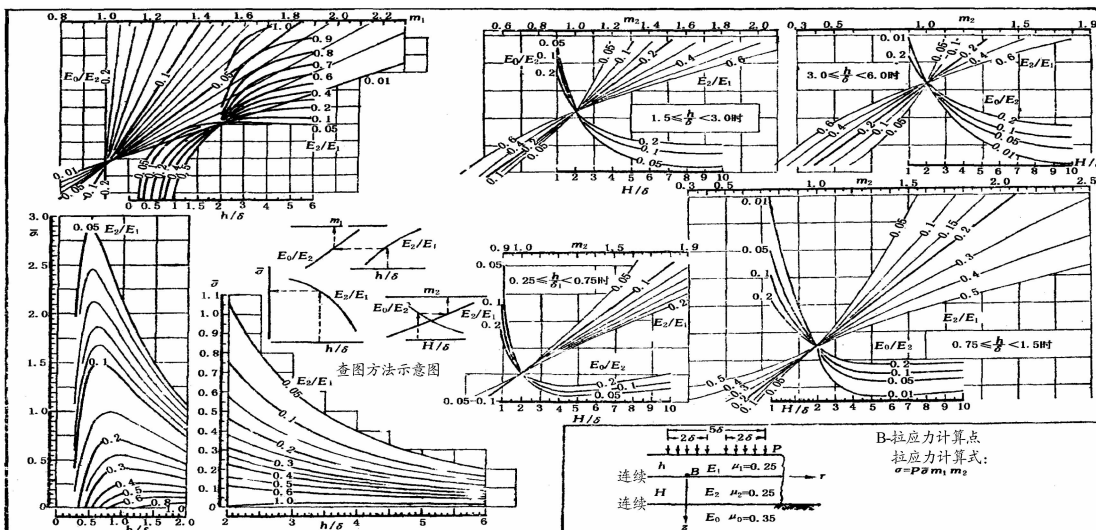


图 4 三层体系上层层底拉应力系数  $\sigma_{r1}$  诺模图

## 5. 验算水泥稳定砂砾半刚性基层层底拉应力

三层体系为:天然砂砾为中层,上层厚度为  $h =$

$$\sum_{k=1}^i h_k \sqrt[4]{E_k/E_i} = 6 \times \sqrt[4]{1800/3000} + 8 \times \sqrt[4]{1600/3000} + 40 = 52.1 \text{ (cm)}。$$

抗拉强度结构系数为:  $K_s = 0.35N_e^{0.11}/A_e = 1.99$ ,  $\sigma_R = \sigma_{sp}/K_s = 0.251 \text{ (MPa)}$ 。由  $h/\delta = 4.89$ ,  $E_2/E_1 = 0.06$ ,  $E_0/E_2 = 0.172$ ,  $H/\delta = 1.88$ 。查图4得,  $\bar{\sigma} = 0.28$ ,  $m_1 = 1.08$ ,  $m_2 = 1.05$ ,  $\sigma_r = 0.22 \text{ (MPa)} < \sigma_R$ ,故水泥稳定砂砾基层层底拉应力验算通过(0.213 MPa)。

最后,由上述计算结果可知,此次拟定的沥青路面结构满足设计弯沉和整体结构层底拉应力的要求,符合规范要求,可以作为最后设计结果。

## 四、结语

文中介绍了沥青路面结构设计新规范中主要的修改内容,包括其中的设计理论和设计方法,以及根据这些改变,详细讲解现行沥青路面结构设计分析的计算过程。结合课程教学大纲要求,考虑学校目前的实际教学条件,针对沥青路面结构设计一章的授课内容要求,介绍了进行沥青路面结构设计的手算详细步骤,包括已知资料、计算公式、详细设计步

骤,及对应设计结果。另外,以算例形式给出了结构手算设计过程,方便学生透彻掌握沥青路面结构设计的理论、依据方法、计算公式及设计结果等内容。通过手算计算结果和软件计算结果的对比分析发现,采用文中所提供的手算方法,沥青路面结构设计的结果和软件计算结果非常接近,证明手算计算方法的可行性,这也为多数学生和科研设计人员采用手算法提供了可靠保证。

## 参考文献:

- [1] 宋高嵩,张春萍,王剑英.《路基路面工程》课程教学改革探讨[J].哈尔滨学院学报,2002,23(8):152-153.
- [2] 马培建,朱亚光.土木工程专业路基路面课程教学内容及方法探讨[J].高等建筑教育,2003,12(3):41-43.
- [3] 中华人民共和国行业标准.JTG D50-2006 沥青混凝土路面设计规范[S].北京:人民交通出版社,2006.
- [4] 内蒙古工业大学.内蒙古工业大学理论课教学大纲[Z].2009.
- [5] 教育部高等教育司.普通高等学校本科专业目录和业介绍[M].北京:高等教育出版社,1998.
- [6] 邓学均.路基路面工程[M].3版.北京:人民交通出版社,2009.
- [7] 陆鼎中,陈家驹.路基路面工程[M].2版.上海:同济大学出版社,2006.

## Research for asphalt pavement structure design based on hand computation

SONG Yunlian, HU Bin, LIN Min

(Civil Engineering Institute, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, P. R. China)

**Abstract:** Based on the new specifications of highway asphalt pavement and books of "subgrade and pavement engineering" published recently, the teaching content of asphalt pavement structural design based on hand computation is compiled, the detailed content includes the known data used in asphalt pavement structural design, computational formula, detailed design step, and design results. This design method is also complied on the basis of the teaching program of this course, our university real teaching condition, and the teaching content demand of asphalt pavement structural design. Otherwise, the design process based on the hand computation is given in example form. This method gives the convenience to students during studying the theory of asphalt pavement structural design, design method, computational formula, design result, and so on.

**Keywords:** asphalt pavement; structural design by hand computation; teaching program; design results; teaching method