

文章编号: 0451-0712(2006)04-0144-05

中图分类号: U416.2

文献标识码: A

# 水泥混凝土路面设计新旧规范对比分析

陈 恺<sup>1</sup>, 王春雷<sup>2</sup>, 张 宁<sup>1</sup>

(1. 东南大学交通学院 南京市 210096; 2. 台州市交通勘察设计院 台州市 318020)

**摘 要:** 以普通水泥混凝土路面设计为例, 比较分析新、旧规范方法下, 面层设计厚度的差异。从定性分析新规范主要修订内容入手, 通过对设计各环节实际算例的计算比较, 找到产生差异的原因, 并将结果汇总到面层厚度设计的实例中, 得出在交通荷载和筑路材料等外部条件相同的情况下, 新规范方法设计厚度较之旧规范薄 2~3 cm 的结论。基层顶面当量回弹模量修正方法的改变是产生差异最为主要的原因。此外, 基垫层材料模量的取值也对面层设计厚度影响显著, 应结合工程实际慎重取值。

**关键词:** 水泥混凝土路面; 面层设计; 规范对比; 模量

自交通部于 1994 年 6 月 7 日发布《公路水泥混凝土路面设计规范》(JTJ 012-94)(以下简称“旧规范”)以来, 我国的水泥混凝土路面建设有了很大的发展, 积累了许多实践经验, 理论上也取得了丰硕的研究成果。为适应我国公路水泥混凝土路面建设不断发展的需要, 交通部于 2002 年 12 月 4 日正式发布了《公路水泥混凝土路面设计规范》(JTG D40-2002)(以下简称“新规范”)。新规范主要增加了路面结构可靠度设计和水泥混凝土上加铺沥青混凝土面层设计方法, 充实了连续配筋混凝土面层配筋计算方法, 细化了路面结构组合、材料组成及性质参数要求, 修改了旧水泥混凝土路面调查和评定方法, 补充了交通分析方法<sup>[1]</sup>。

新规范发布实施已 3 年, 对规范的理解、应用和研究都累积了一些经验。从实际的水泥混凝土路面设计工程来看, 在面层设计厚度方面, 存在新规范较旧规范偏薄的现象。这一现象是否具有一般性的意义? 从设计方法上分析, 其产生的原因是什么? 本文以普通水泥混凝土路面这一典型面层类型为例, 试阐述面层设计过程中新规范主要的修订内容, 并分析其对面层最终设计厚度的影响; 通过实际算例的计算, 得到在外部条件相同的情况下, 由新、旧规范各自计算所得的面层设计厚度的差异; 并通过对设计流程各个环节的分析, 找到产生差异的原因。对于其他类型的面层设计, 由于设计原理、流程的相似

性, 本文的结论在一定程度上同样适用。

## 1 主要修订内容综述

对普通水泥混凝土路面设计而言, 新规范主要的修订内容包括以下几个方面。

### 1.1 可靠度设计方法和参数

由于水泥混凝土等筑路材料的非均质性和施工偏差, 以及道路在使用期内的环境和荷载条件的变异, 使水泥混凝土路面结构的设计参数具有一定的不确定性。旧规范未能详尽地考虑这些不确定性因素, 而采用确定型方法, 对荷载应力和温度应力综合疲劳作用所产生的疲劳断裂进行控制。新规范将引起路面结构设计结果不确定性的因素分为 3 类, 即结构设计参数的变异性、交通荷载的预估偏差以及设计方法与实际情况的不相符性。其中, 交通荷载的预估偏差由于设计初期的标准轴载作用次数变异规律尚难以把握, 交通量增长率的预测精度又较低, 因此其变异性暂不予考虑<sup>[2]</sup>。综合考虑其他 2 个不确定因素, 得到综合的可靠度修正系数  $\gamma_r$ , 并有:

$$\gamma_r(\sigma_{pr} + \sigma_{tr}) \leq f_r \quad (1)$$

式中:  $\gamma_r$  为可靠度系数;  $\sigma_{pr}$  为行车荷载疲劳应力, MPa;  $\sigma_{tr}$  为温度梯度疲劳应力, MPa;  $f_r$  为水泥混凝土弯拉强度标准值, MPa。

由式(1)可见, 可靠度系数  $\gamma_r$  的取值, 将直接影响面层最终设计厚度。



## 1.2 交通分析方法及交通量等级划分

由于长期以来缺少轴载谱,标准轴载累计作用次数主要利用交通量观测站的数据进行预估,难以得到准确值,旧规范也因此按使用初期设计车道每日通过的标准轴载作用次数划分交通量等级。近年来由于轴载称重仪的推广使用,逐步具备获取轴载谱的条件,新规范因此增添了交通分析方法,根据轴型将各级轴载换算为标准轴载,并以设计基准期内标准轴载累计作用次数划分交通量等级。新规范的交通分析和交通量等级划分方法,较旧规范更能反映设计基准期内交通量的整体情况。然而,面对如今超载现象日益严重的交通状况,新规范方法是否有效,还有待于实际工程的检验。

## 1.3 应力分析

### 1.3.1 荷载应力分析

新规范对轴载作用于四边自由矩形板纵向边缘中部所产生的荷载应力,采用与旧规范形式相同的回归公式,但应用有限元法重新进行了计算分析,拓宽了公式适用范围,也得到了新的回归系数,即:

$$\sigma_p = Ar^m P^n h^{-2} \quad (2)$$

式中: $\sigma_p$  为轴载作用下临界荷位处应力,MPa; $r$  为水泥混凝土板的相对刚度半径,m; $P$  为轴重,kN; $h$  为水泥混凝土板厚度,m; $A$ 、 $m$ 、 $n$  为与轴型有关的回归系数,见表1。

表1 荷载应力公式回归系数

轴型	$A$	$m$	$n$
单轴—单轮	0.002 47	0.707	0.881
单轴—双轮组	0.001 75	0.862	0.905
双轴—双轮组	0.000 872	0.843	0.893
三轴—双轮组	0.000 541	0.710	0.892

对应的旧规范回归系数如表2所列。

表2 荷载应力公式回归系数

轴型	$A$	$m$	$n$
单轴	0.873 84	0.738 12	0.826 29
双轴	0.257 71	0.870 90	0.836 25

注:与表2中系数对应的式(2)的板厚和相对刚度半径的单位为cm。

以标准轴载为例,将 $P=100$  kN和表1、表2对应系数分别代入到式(2)中,得到:

$$\sigma_{p-new} = 0.113r^{0.862}h^{-2} \quad (3)$$

$$\sigma_{p-old} = 0.118r^{0.738}h^{-2} \quad (4)$$

由于相对刚度半径 $r$ 一般小于1,因此由上式计

算的荷载应力,新规范较旧规范偏小。

此外,由于水泥混凝土路面结构的应力计算是基于地基模型为弹性半无限空间体的假设,而实际水泥混凝土面板的基础为层状结构,它们之间存在着明显的差异<sup>[3]</sup>。为修正这一差异,新规范与旧规范类似,引入一个系数 $n_0$ 对基层顶面当量回弹模量进行修正,经修正后的地基模量称之为基层顶面当量计算模量,则有:

$$E_c = n_0 E_t \quad (5)$$

$$n_0 = 3.79r^{0.92} \quad (6)$$

式中: $E_c$ 为基层顶面当量计算模量,MPa; $n_0$ 为基层顶面模量修正系数; $E_t$ 为基层顶面当量回弹模量,MPa。

对应的旧规范修正系数计算公式为:

$$n_0 = 0.0684 \left( \frac{hE_c}{E_t} \right)^{0.8} \quad (7)$$

值得一提的是,姚祖康教授曾指出,旧规范修正系数的计算公式,在应用于大刚度的基层时,会出现小于1的反常情况,过于保守地估计了基层刚度和厚度对结构承载的影响,建议采用如下形式的修正公式<sup>[4]</sup>:

$$n_0 = -0.336 + 0.029h \left( \frac{E_c}{E_t} \right)^{1/3} \quad (8)$$

而新规范利用式(6)进行修正计算,实际上是谈至明等认为水泥混凝土路面的基层顶面模量修正和沥青混凝土路面的弯沉修正具有相同的概念和性质,利用了沥青混凝土路面的弯沉综合修正系数经验关系式推导出来的,且考虑到沥青混凝土路面综合弯沉修正系数经验关系式的数据量较多,公式形式的外延性较好才采用的,实际上式(6)和式(8)的计算结果很接近<sup>[4]</sup>。与旧规范相比,新规范对基层顶面当量回弹模量的修正适当放大了基层的贡献,比旧规范更加适用于大刚度、大厚度基层。

综上,新规范荷载应力的计算公式,虽与旧规范有着相同的形式,但经重新计算分析后的回归系数以及修正公式都已发生较大改变,将会对面层最终设计厚度造成影响。

### 1.3.2 温度应力分析

新规范对温度应力的计算修订幅度不大,设计原理和计算公式同旧规范相同,只是将疲劳应力系数由旧规范的查图表,改为给出回归公式计算。这样简化了设计,也减少了计算误差。另外,为考虑水泥混凝土和地基在温度应力下的徐变效应,都对模量进行了修正。旧规范对基层顶面当量回弹模量乘以



0.35 的修正系数;新规范参照美国混凝土协会(ACI)的徐变公式(ACI209-71)和推荐参数,对面层水泥混凝土的模量乘以 0.85 的系数,对基层顶面当量回弹模量乘以 0.70 的系数,并将修正计入到温度应力计算式和计算曲线中<sup>[5]</sup>。

由之后的算例可以看出,两者计算所得的温度应力也存在差别,而一般以新规范计算值偏小。

### 1.3.3 基层顶面当量回弹模量的计算

旧规范的基层顶面当量回弹模量的计算方法,是依据双层弹性体系公式和图表提出的,对于三层和三层以上的弹性体系,计算结果会与多层体系计算值偏差较大。新规范直接采用三层弹性体系程序进行计算,将基层、垫层按等弯曲刚度的原则换算为回弹当量模量和当量厚度的单层结构之后,再按双层体系计算。其计算结果与多层体系计算值偏差在 1%~4% 范围之内<sup>[1]</sup>。

另外,由于旧规范模量取值引自 1986 年发布的公路柔性路面设计规范,而新规范模量取值则参考了 1997 年发布的《公路沥青路面设计规范》(JTJ 014-97)。比较新旧规范附录中给出的路基和垫层材料回弹模量经验参考值,会发现两者取值不同,一般新规范取值偏大,有些材料差别较大。如:二灰土,由 275 MPa 左右,增大到 750 MPa 左右;石灰粉煤灰稳定粒料,由 600 MPa 左右,增大到 1 500 MPa 左右。模量取值的大幅提高,主要是考虑了施工工艺水平的提高、材料变异性降低等有利因素。

参数取值和计算方法的改变,将使得基层顶面当量回弹模量的计算结果产生差异,进而影响面层最终的设计厚度。

## 2 计算示例及对比分析

以上阐述了新规范在进行普通水泥混凝土面层设计过程中的主要修订内容,以下将通过实际示例的计算,从基层顶面当量回弹模量、荷载应力、温度应力的计算等几个方面,分析新、旧规范计算结果的差异和产生差异的原因,并将三者汇总到最终的面层厚度的设计中。

### 2.1 基层顶面当量回弹模量

基层顶面当量回弹模量的计算,其参数取值和计算方法都发生了较大的改变。下面以相同的结构层组合设计,材料模量分别从新、旧规范中取值,套用各自的计算方法,试算几例,计算结果如表 3

所示。

表 3 基层顶面当量回弹模量对比分析

	土基层	垫层	基层	模量(由下至上)/MPa	基层顶面当量回弹模量 MPa
新规范	粘质土	20 cm	20 cm	20,750,1 500	162
旧规范		二灰土	二灰碎石	20,275,600	170
新规范	粘质土	20 cm	25 cm	20,750,1 500	181
旧规范		二灰土	二灰碎石	20,275,600	197
新规范	粘质土	20 cm	20 cm	30,750,1 500	206
旧规范		二灰土	二灰碎石	30,275,600	200
新规范	粘质土	20 cm	20 cm	20,750,800	142
旧规范		二灰土	沥青碎石	20,275,800	186

由表 3 可见:新规范方法计算的基层顶面当量回弹模量,在各结构层材料模量大幅提高的情况下,并没有如想象中偏大,而是与旧规范接近、甚至偏小,在不同厚度和材料下,都有类似的结论。此外,新规范更加强调土基层的重要性,土基层的加强对基层顶面当量回弹模量的贡献大于加强基层的作用。

从计算方法上看,新、旧规范都是基于弹性层状体系的假设,按照等弯曲刚度的原则进行计算;差别仅在于是依据双层或是三层弹性体系。为验证新规范计算结果,笔者参照柔性路面设计规范,以弹性多层体系计算方法,对表 3 的结构组合重新进行计算,发现弹性多层体系的计算结果确实同新规范计算结果比较接近。

总之,计算模式的改变和材料模量取值的变化都将影响基层顶面当量回弹模量值,而且两者的影响都较为显著。因此,在工程实践中,材料模量应当参考规范建议,并结合实际情况,慎重取值。

### 2.2 荷载应力

为了便于横向比较新、旧规范计算结果,计算过程套用相同的回归公式,即式(2)进行计算,并分别列出其修正效果。假定混凝土弯拉弹性模量为 30 GPa,混凝土路面板长为 5 m,计算结果如表 4 所列。

由表 4 可见:在相同的面层厚度和基层顶面当量回弹模量的情况下,新、旧规范计算结果相差较大,旧规范计算结果普遍比新规范大 30%~40%;而且随面层厚度的降低和基层顶面当量回弹模量的增加,这一差距有拉大的趋势。究其原因,主要是新规范适当放大了基层对结构承载的贡献,使得基层顶面模量修正系数两者相差 1 倍左右。



表4 荷载应力对比分析

	面层板厚度 m	基层顶面当量回 弹模量/MPa	混凝土板相对 刚度半径/m	基层顶面模量修 正系数 $n_0$	基层顶面当量计 算模量/MPa	修正后的混凝土板 相对刚度半径/m	标准荷载下临界 荷位处应力/MPa
新规范	0.24	200	0.685	2.675	535.026	0.493	1.067
旧规范				1.202	240.489	0.644	1.475
新规范	0.20	200	0.571	2.262	452.405	0.435	1.378
旧规范				1.039	207.85	0.563	1.924
新规范	0.24	160	0.738	2.865	458.336	0.519	1.115
旧规范				1.437	229.992	0.654	1.491

可以预见,新规范荷载应力的计算结果较旧规范偏小,将使得最终面层设计厚度偏薄。

2.3 温度应力

与荷载应力计算对比分析类似,新、旧规范采用相同的计算公式,将各自的修正效果分别列出后,改变面层厚度和基层顶面当量回弹模量,观察其温度应力的差异。其他的已知条件假定为:混凝土弯拉弹性模量为30 GPa,混凝土面板长为5 m,混凝土线膨胀系数为0.000 01/℃,最大温度梯度为86℃/m。计算结果如表5所列。

表5 温度应力对比分析

	面层板 厚度/m	基层顶面 当量回弹 模量/MPa	混凝土板 相对刚度 半径/m	修正后的混凝 土板相对刚度 半径/m	温度应力 MPa
新规范	0.24	200	0.685	0.731	1.755
旧规范				0.972	2.144
新规范	0.20	200	0.571	0.609	1.603
旧规范				0.890	2.314
新规范	0.24	160	0.738	0.787	1.732
旧规范				1.047	2.090

由表5可见:在相同的面层厚度和基层顶面当量回弹模量的情况下,旧规范计算结果较新规范计算结果偏大;而且随面层厚度的降低和基层顶面当量回弹模量的增加,这一差距有拉大的趋势。其主要原因依然是规范对基层顶面当量回弹模量的修正方法和修正系数的差异造成的。

温度应力和荷载应力的新、旧规范对比分析,计算结果有着相同的趋势,即新规范计算结果都偏小。那么面层最终的设计厚度,新规范偏薄也是可以预计的。

2.4 面层设计厚度

将以上新、旧规范对比分析汇总,对一实例进行

结构组合设计和面层厚度计算。在交通荷载和筑路材料等外部条件相同的情况下,分别采用新、旧规范方法,得到各自的面层设计厚度。算例描述如下:在公路自然区划Ⅳ区拟新建一条一级公路,面层为普通水泥混凝土路面,重交通量等级,使用期末累计标准轴载作用次数为900万次/车道,面层混凝土的弯拉强度标准值为5 MPa,弯拉弹性模量为30 GPa,面层板长为500 cm、宽为400 cm;最大温度梯度取86℃/m,混凝土线膨胀系数取0.000 01/℃,新、旧规范中应力折减系数都取为0.87;荷载疲劳应力系数由交通量确定,新规范为2.491,旧规范为2.285;综合系数由公路等级或交通量等级确定,新规范为1.25,旧规范为1.35。详细的计算结果如表6所列。

由表6可见:在交通荷载和结构组合设计等外部条件相同的情况下,新规范计算的面层厚度较旧规范的设计值小2~3 cm。

3 结语

由以上的修订内容综述、示例计算和对比分析可以看出,新规范方法下的普通水泥混凝土路面面层设计厚度确实较旧规范方法设计值偏薄,在交通荷载和筑路材料等外部条件相同的情况下,约偏薄2~3 cm。从设计方法和设计流程上看,产生这一差异的主要原因有以下几点:

- (1)荷载应力的计算,应用有限元方法重新进行了分析,得到新的回归系数;
- (2)在计算荷载应力和温度应力时,基层顶面当量回弹模量的修正公式发生了改变;
- (3)路基和基垫层材料的模量取值变化幅度较大,基层顶面当量回弹模量的计算模式也发生了改变。

其中,又以第(2)点,即基层顶面当量回弹模量的修正公式的变化,对面层设计厚度的影响最为显



表 6 面层设计厚度

	土基层	垫层	基层	模量(由下至上)/MPa	面层设计厚度 cm	荷载疲劳应力 MPa	温度疲劳应力 MPa
新规范	粘质土	20 cm	20 cm	20,750,1 500	21.7	3.466	0.982
旧规范		二灰土	二灰碎石	20,275,600	24.2	3.941	1.188
新规范	粘质土	20 cm	25 cm	20,750,1 500	21.4	3.457	0.985
旧规范		二灰土	二灰碎石	20,275,600	24.2	3.913	1.237
新规范	粘质土	20 cm	20 cm	30,750,1 500	20.9	3.482	0.981
旧规范		二灰土	二灰碎石	30,275,600	24.3	3.886	1.237
新规范	粘质土	20 cm	20 cm	20,750,800	22.0	3.489	0.970
旧规范		二灰土	沥青碎石	20,275,800	24.2	3.923	1.219

说明:(1)为了便于横向比较,表中面层设计厚度都为满足规范要求的最小值,即最优厚度;(2)新规范可靠度系数的取值,会直接影响面层设计厚度,为了横向比较具有一般意义,可靠度系数取 1.12,这是对应一级公路的常见取值。

著。此外,路基和基垫层材料的模量取值变化幅度较大,在工程实践中,应当参考规范建议,并紧密结合实际情况,慎重取值。

总之,新规范对普通混凝土路面的设计,比较全面地考虑了施工工艺水平的提高、材料变异性降低等有利因素,也更为客观地反映了半刚性基层强度高、厚度大对结构承载的贡献。然而,交通水平持续增长,超载现象日益严重,旧规范方法设计下的路面已经不堪重负,早期破坏问题较为突出;而新规范方法设计的面层厚度反而较旧规范偏薄。这一结果是否合理,值得探讨,更需要工程实践的检验。

#### 参考文献:

- [1] JTG D40—2002,公路水泥混凝土路面设计规范[S].
- [2] 谈至明,姚祖康,刘伯莹. 水泥混凝土路面结构可靠性设计方法[J]. 公路,2002,(8).
- [3] 谈至明,姚祖康,田波. 水泥混凝土路面的荷载应力分析[J]. 公路,2002,(8).
- [4] 姚祖康. 水泥混凝土路面设计理论和方法[M]. 北京:人民交通出版社,2003.
- [5] 谈至明,姚祖康,刘伯莹. 水泥混凝土路面的温度应力分析[J]. 公路,2002,(8).
- [6] 刘伯莹,姚祖康.《公路水泥混凝土路面设计规范》修订综述[J]. 公路,2002,(8).
- [7] JTJ 012—94,公路水泥混凝土路面设计规范[S].

## Analysis and Comparison of Specifications for Cement Concrete Pavement Design

CHEN Kai<sup>1</sup>, WANG Chun-lei<sup>2</sup>, ZHANG Ning<sup>1</sup>

(1. Transportation College, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Transportation Survey & Design Institute of Taizhou, Taizhou 318020, China)

**Abstract:** Take the plain concrete pavement design for example, the comparison is carried out to find out the differences of thickness of surface design between the two sets of specifications. First qualitative analysis is done on the content of the emendation of the newer specification. Then the reasons that bring on the differences are found through the calculation of the samples from the stages of design process. Finally all the results are put into the sample of surface design. It is concluded that the thickness of surface designed by newer specification is thinner than that of older one by about 2~3 cm, in the case of the identical circumstances, such as traffic loads, materials, etc. The variation of the correction method for base equivalent resilient modulus is the main reason which brings on the difference; besides, the value of the base material modulus has remarkable impact on the thickness of surface design, so it is reasonable to set it cautiously conforming to the fact.

**Key words:** cement concrete pavement; surface design; specifications comparison; modulus