

路面结构计算和设计电算方法

邓学钧 黄 卫 黄晓明 编著



东南大学出版社

前 言

路面设计原理与计算方法是路面设计的基础。随着科学技术的发展,路面设计方法不断完善,自本世纪 30 年代以来,以弹性力学为基础的柔性路面设计方法与刚性路面设计方法逐步形成了较为完整的体系,因而被许多国家采纳。特别是 60 年代以来,随着计算机科学及有限元技术的发展,路面设计与计算程序日臻完善。本书从路面力学计算和设计方面反映了作者多年的研究成果。

本书按照计算机分析的难易程度及路面分析与设计的顺序由浅入深编写。全书共分十章,第一章路面设计基本方法,第二章弹性地基无限大板应力分析,第三章刚性路面荷载应力有限元分析,第四章弹性多层体系应力应变分析,第五章柔性路面结构近似分析方法,第六章柔性路面设计程序,第七章刚性路面设计程序,第八章路面结构优化设计,第九章柔性路面典型结构设计分析,第十章路面结构动力响应分析。

本书涉及内容较多,在理论体系上有一定深度,同时也注重实践应用。本书主要反映了作者近年来从事自然科学基金研究、国家攻关项目研究和省部有关项目研究最新成果,已经在教学中使用多年,取得了很好的效果。如将本书作为教学用书,建议将路面力学、路面工程及 FORTRAN 语言列为先修课程,同时要特别强调上机实践。

本书第一章、第二章由邓学钧教授编写;第三章第一节、第二节,第五章,第六章,第八章和第九章由黄卫教授编写;第三章第三节、第四节、第五节,第四章,第七章,第十章由黄晓明教授编写,全书由邓学钧教授统稿。

书中涉及的计算与设计程序另配有软件。限于水平和能力,难免有不少疏漏和错误,恳请读者批评指正。

编 者

1996 年 5 月

内容简介

本书主要由三部分组成：第一部分全面介绍了沥青路面、水泥混凝土路面应力分析理论及计算机程序；第二部分介绍了沥青路面及水泥混凝土路面的设计方法和设计程序；第三部分介绍了作者进行的基础理论研究的成果，路面结构在动荷作用下的分析方法。

本书可供公路、城市道路、林业道路、厂矿道路及机场道面工程技术人员及有关大专院校师生学习参考。

路面结构计算和设计电算方法

邓学钧 黄卫 黄晓明 编著

*

东南大学出版社出版发行

(南京四牌楼2号 邮编210096)

江苏省新华书店经销 南京通达彩色印刷厂印刷

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 16.25 字数 394 千

1997年8月第1版 1997年8月第1次印刷

印数：1-1000册

ISBN 7-81050-251-4/U·2

定价：15.00 元

(凡因印装质量问题，可直接向承印厂调换)

目 录

第一章 路面设计基本方法	1
§ 1-1 刚性路面设计方法.....	1
§ 1-2 柔性路面设计方法.....	9
§ 1-3 路面结构优化设计	14
第二章 弹性地基无限大板应力分析	16
§ 2-1 基本假设和弹性曲面方程	16
§ 2-2 地基假定与地基模型	18
§ 2-3 弹性地基板荷载应力解	19
§ 2-4 贝塞尔函数无穷积分及计算程序	23
§ 2-5 刚性路面应力计算程序	29
第三章 刚性路面荷载应力有限元分析	40
§ 3-1 概述	40
§ 3-2 刚性路面有限元分析基本原理和方法	41
§ 3-3 刚性路面有限元分析程序	58
§ 3-4 接缝混凝土路面的有限元分析	76
§ 3-5 多层地基板及夹层结构混凝土路面有限元分析.....	100
第四章 弹性多层体系应力应变分析	107
§ 4-1 概述.....	107
§ 4-2 弹性多层体系应力应变分析的基本原理.....	107
§ 4-3 多层体系应力分析子程序.....	117
§ 4-4 弹性多层体系应力、位移分析程序.....	131
第五章 柔性路面结构近似分析方法	139
§ 5-1 概述.....	139
§ 5-2 回归逼近范围.....	139
§ 5-3 数学模型.....	141
§ 5-4 数学模型的转换.....	143
§ 5-5 回归过程和结果.....	145
§ 5-6 简式的改进.....	151
第六章 柔性路面设计程序	158

§ 6-1 柔性路面设计方法和步骤·····	158
§ 6-2 厚度计算和应力验算程序·····	160
§ 6-3 APDP 程序输入输出说明·····	162
§ 6-4 程序的使用和计算实例·····	163
第七章 刚性路面设计程序·····	171
§ 7-1 刚性路面板厚计算的步骤和方法·····	171
§ 7-2 刚性路面应力验算及厚度设计程序·····	175
第八章 路面结构优化设计·····	182
§ 8-1 概述·····	182
§ 8-2 可变容差法·····	183
§ 8-3 结构优化设计数学模型·····	184
§ 8-4 随机搜索法优化柔性路面结构设计·····	189
§ 8-5 刚性路面优化设计程序·····	193
§ 8-6 柔性路面优化设计程序·····	197
第九章 柔性路面典型结构设计分析·····	202
§ 9-1 概述·····	202
§ 9-2 典型结构组合的原则·····	203
§ 9-3 路基路面结构参数敏感性分析·····	206
§ 9-4 路面典型结构设计图表·····	210
第十章 路面结构动力响应分析·····	215
§ 10-1 补充的数学知识·····	215
§ 10-2 路面结构所受动力荷载的种类·····	223
§ 10-3 温克勒地基板在动荷载作用下的力学分析·····	224
§ 10-4 弹性半空间地基板在动荷载作用下的力学分析·····	230
§ 10-5 层状体系有限元动力响应分析·····	243
参考文献·····	249

第一章 路面设计基本方法

§ 1-1 刚性路面设计方法

一、概 述

水泥混凝土路面板具有较高的力学强度,同时又具有较高的弹性模量,在荷载作用之下变形微小,因此从力学观点出发,把水泥混凝土路面称之为刚性路面。水泥混凝土路面有许多种类,如不配筋素混凝土路面、配筋的钢筋混凝土路面、连续配筋混凝土路面、预应力混凝土路面、钢纤维混凝土路面等。由于它们具有相近的力学特征和工作特性,因此都归纳入刚性路面范畴。各类水泥混凝土路面的设计原理与方法基本上相类同。

混凝土路面板的弹性模量及力学强度大大高于基层或土基的弹性模量及力学强度,此外,混凝土材料的抗弯拉强度远小于其抗压强度,因此在外荷载作用下,路面板产生破坏的主要形式为局部位置弯拉应力超过容许应力而产生各种形式的板体断裂。

1876年法国初次修筑了水泥混凝土路面,44年后,欧尔德(C. Older)和哥尔德贝克(A. T. Goldbeck)根据材料力学原理,提出了最早的刚性路面荷载应力计算方法及路面应力计算和厚度设计方法。自20年代至60年代,刚性路面应力计算及厚度设计方法方面的研究日趋完善。1926年,威斯特卡德(H. M. Westergaard),1938年,霍格(A. H. A. Hogg),1939年,舍赫捷尔(О. Я. Шехтер),1943年,波米斯特(D. M. Burmister),1953年,柯岗(Б. Н. Коран)等人,对刚性路面荷载应力及厚度设计方法的研究与贡献为刚性路面设计方法奠定了基础。60年代中期,有限元法的应用使刚性路面应力分析与设计计算有了新的发展。张佑启和森克维琦(O. C. Zienkiewicz)提出了弹性地基板的有限元分析法,敖德逊和玛特洛克(W. R. Hudson and H. Matlock)用离散单元法分析了温克勒(Winkler)地基上刚性路面板存在脱空情况下的应力分析方法。70年代初沙捷斯(M. Sargiou)及张佑启、黄仰贤和王先俊系统探讨了弹性地基刚性路面的有限元分析法。80年代初黄仰贤与邓学钧合作完成了由若干块板组成的多板系统的有限元分析及简化分析法。

随着有限元分析法研究工作的逐步深入,使得过去无法解决的工程计算问题有了解决的可能,如有限大矩形板在任意位置荷载作用下,计算任意位置的应力及位移;具有传力功能的多板系统的应力、位移计算;地基不均匀支承和地基部分脱空情况下的应力分析等。我国道路工程界在学习国内外研究成果的基础上开展了广泛的研究工作,并且将研究成果系统化,成为现行刚性路面设计规范的基础。

最近10年,刚性路面有限元分析又有了新的进展。如利用该方法对中厚板或厚板问题

进行应力计算分析,对层间有软弱夹层的双层板的应力分析;采用有限元半分析法分析刚性路面应力状态等。这些研究工作将推动刚性路面应力分析与设计计算方法进入一个新的阶段。

二、刚性路面设计基础原理

(一) 基本理论与力学模型

目前的刚性路面应力分析与设计方法,多数是以弹性地基上的薄板为基本力学模型。弹性地基包括温克勒地基、弹性均质半空间地基与弹性层状半空间地基。对于路面板如果板体的厚度远小于板体平面的最小尺寸,同时在侧向荷载作用之下,板体的挠度远小于板的厚度,则称为小挠度薄板。混凝土路面板在正常工作状态之下,完全符合小挠度薄板的假定,因此,基本理论就是以这样的力学模型为基础推演形成的。

威斯特卡德于1925年最先提出了以温克勒地基上薄板为力学模型的刚性路面应力分析与厚度设计方法及公式。该公式目前仍是许多国家设计方法的基础。威氏研究了三种典型临界荷载位置下板体最大挠度和最大应力,这三种位置如图1-1所示。

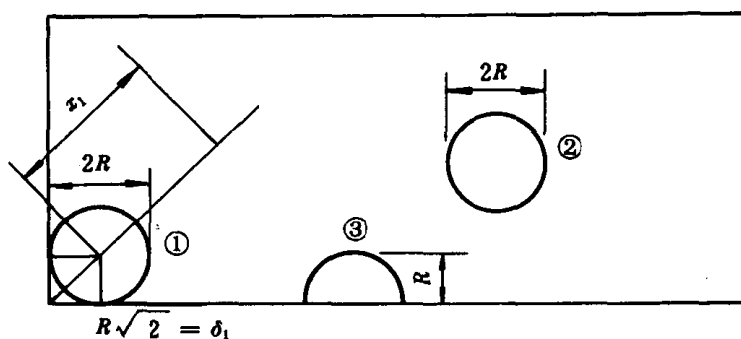


图1-1 威氏公式荷载位置图

三种荷载位置作用下的最大应力公式分别为

1. 荷载作用于板角

$$\sigma_c = \frac{3P}{h^2} \left[1 - \left(\frac{R}{l} \right)^{0.6} \right] \quad (1-1)$$

2. 荷载作用于板中心

$$\sigma_i = 1.265 \frac{P}{h^2} \left(\lg \frac{l}{b} + 0.2673 \right) \quad (1-2)$$

3. 荷载作用于板边缘

$$\sigma_e = 2.287 \frac{P}{h^2} \left(\lg \frac{l}{b} + 0.898 \right) \quad (1-3)$$

式中: P ——车轮荷载;

h ——路面板厚度;

R ——车轮荷载圆半径;

b ——当量圆计算半径,

$$\begin{aligned} b &= \sqrt{1.6R^2 + h^2} - 0.67h & R < 1.724h \\ b &= a & R \geq 1.724h \end{aligned} \quad (1-4)$$

l ——相对刚性半径,

$$l = \sqrt[4]{\frac{E_c h^3}{12(1 - \mu_c^2)K}} \quad (1-5)$$

E_c ——混凝土弹性模量;

μ_c ——泊松系数;

K ——地基反应模量。

霍格于 1938 年最先提出了以弹性半空间地基上薄板为力学模型的刚性路面应力分析及厚度计算方法,我国目前采用的刚性路面设计方法的基本理论模型便是由此建立的。它假设地基为一各向同性的弹性半空间体。应用了该模型推演形成弹性半空间地基上无限大薄板中心作用有圆形均布荷载时的内力计算公式,如图 1-2 所示。

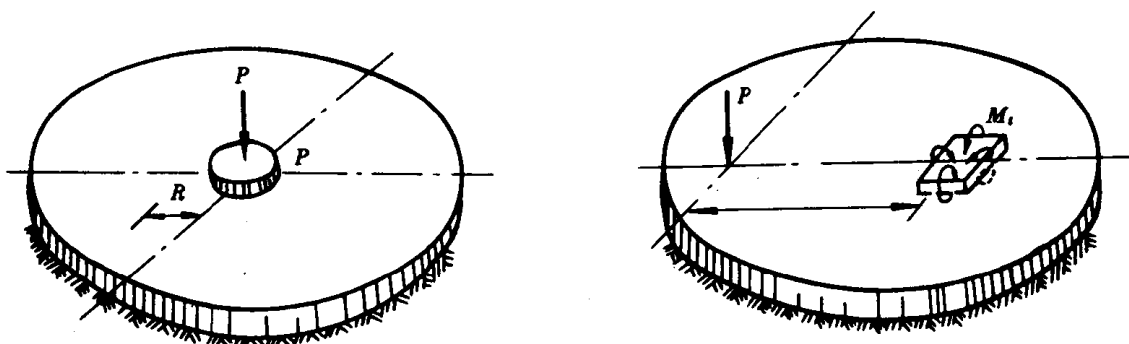


图 1-2 无限大板上圆形均布荷载

无限大板的弯矩公式如下

$$M_o = \frac{CP(1 + \mu_c)}{2\pi\alpha R} = \overline{M}_o P \quad (1-6)$$

$$M_t = (A + \mu_c B)P = \overline{M}_t P \quad (1-7)$$

$$M_r = (B + \mu_c A)P = \overline{M}_r P \quad (1-8)$$

式中: M_o ——荷载中心弯矩;

M_t ——荷载中心以外任意点,因荷载引起的切向弯矩;

M_r ——荷载中心以外任意点,因荷载引起的辐向弯矩;

A, B, C ——随 α, r, R 值而变的系数,

$$\alpha = \frac{1}{h} \sqrt[3]{\frac{6E_s(1 - \mu_c^2)}{E_c(1 - \mu_s^2)}} \quad (1-9)$$

R ——车轮荷载圆的半径;

r ——任意点至荷载中心的距离;

E_c, μ_c ——混凝土的弹性模量与泊松系数;

E_s, μ_s ——地基的弹性模量与泊松系数;

$\overline{M}_o, \overline{M}_l, \overline{M}_r$ ——路面板的弯矩系数。

(二) 地基支承与地基反应模量

刚性路面的地基支承是刚性路面正常工作的重要条件。路面板由于其本身具有相当的刚度与强度,承担了外载的各种破坏作用,通过面板传递给地基的压力很小,一般不超过 0.05 MPa。因此,水泥混凝土路面无需对地基要求过高的强度。然而要求地基提供均衡稳定的支承,如果在车轮荷载反复作用下和周围水温变化的影响下,出现不均匀沉陷,仍将导致路面板使用品质下降和产生断裂损坏。

水泥混凝土路面的地基通常包括土基与基层二部分,早期的水泥混凝土路面直接建造在土基上,使用实践证明,直接修建在土基上的路面在重型车辆与水温变化的条件下路面板极易损坏,现代公路水泥混凝土路面都建造较强的基层,它们一般都采用稳定性良好的粒料稳定基层,确保路面板的稳定性与耐久性。

根据弹性地基板力学模型的描述,刚性路面的地基有二种类型,即温克勒地基模型与弹性半空间地基模型,它们分别由不同的弹性特性参数来表述。温克勒地基假定认为每单位面积上所受的壓力与地基的沉降成正比,地基的反应力用一系数 K 与受力点的挠度 z 的乘积来表示,即

$$p = Kz \quad (1-10)$$

式中: p ——地基顶面某一点的反力, MPa;

K ——地基反应模量, MPa/cm;

z ——竖向挠度, cm。

温克勒地基假说认为地基某一点的沉陷仅决定于作用于该点的压力,而和邻近的地基不发生联系,地基的受压作用正如许多彼此不相联系的弹簧受压情况一样(图 1-3a)。

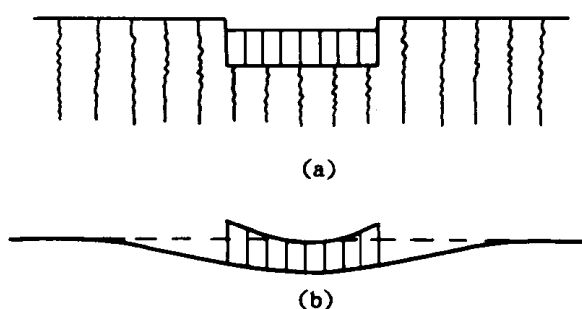


图 1-3 不同假设地基的表面变形

(a) 温克勒地基; (b) 弹性半空间地基

弹性半空间地基假定认为刚性路面的地基为一连续、均质、各向同性的弹性体。其力学特性用弹性模量 E_0 和泊松系数 μ_0 来表征。地基表面的垂直位移与荷载的关系可以用以下位移计算式表示

$$w(r) = \frac{2(1 - \mu_0^2)}{E_0} \int_0^\infty \bar{p}(\xi) J_0(\xi) d\xi \quad (1-11)$$

式中: $w(r)$ ——竖向位移函数;

$\bar{p}(\xi)$ ——地基表面轴对称荷载 $p(r)$ 的零阶亨格尔变换式;

$J_0(\xi r)$ ——第一类零阶贝塞尔函数;

r ——离开荷载作用点的距离;

ξ ——任意参数。

弹性半空间地基的沉降特性如图 1-3b 所示,由图中可以看出此二种模型的区别。

地基反应模量的测定采用直径为 76 cm 的钢质标准承载板在有代表性的当地路基上作加载试验,一般认为采用荷载强度为 0.07 MPa 可以获得最有代表性的 K 值。计算 K 值时可将测得数据代入下式:

$$K = \frac{p}{z} \quad (1-12)$$

地基弹性模量 E_0 的测定通常采用直径为 28 cm 的钢质标准承载板,分级加载,按平均沉降为 1 mm 来确定地基回弹模量,具体计算可按下式进行:

$$E_0 = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{2pa(1 - \mu_0^2)}{l} \quad (1-13)$$

式中: a ——承载板半径, cm;

l ——承载板沉降值, cm;

μ_0 ——泊松系数,对于土基通常取 $\mu_0 = 0.35$ 。

地基的实际工作状态是极其复杂的,并不像力学模型描述的那么简单,主要表现在它的非均匀、非弹性、非线性方面。用承载板测定的参数只能代表在特定条件下的参数,实际上在路面板下面的地基处于各不相同的工作状态之下。通过承载板实地测定与路面板整体结构测试相对比得到修正参数的公式

$$E_s = (6.3 \frac{h}{E_0} + 0.44) E_0 \quad (1-14)$$

式中: E_0 ——用标准承载板测得的地基弹性模量, MPa;

E_s ——考虑路面结构实际工作状态,经修正的地基弹性模量, MPa;

h ——混凝土路面板的厚度, cm。

(三) 车轮荷载与路面的疲劳特性

车轮荷载的大小和作用次数的多少是路面结构遭受损坏的主要因素,也是刚性路面厚度设计的主要依据。通常都根据各国车辆运行的实际情况确定标准轴载,其它非标准轴载通过等效作用原理换算为当量标准轴载的通过次数。我国刚性路面设计规范规定后轴重 100kN(10t)为标准轴载。

$$\lg N = 1.171 - 19.115 \lg \frac{\sigma_f}{\sigma_s} \quad (1-15)$$

式中: σ_s ——混凝土的极限抗折强度,即一次达到破坏的强度, MPa;

σ_f ——疲劳试验的重复应力, MPa;

N ——达到破坏时的重复加载次数。

对于同一路面结构,不同轴载引起的弯拉应力代入式(1-15),经过整理后,即可得到不同轴载作用次数之间的当量换算关系,简化后得出

$$f = \frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{16} \quad (1-16)$$

式中: f ——当量轴载换算系数;

N_2, P_2 ——非标准轴载通过次数及轴重;

N_1, P_1 ——标准轴载通过次数及轴重。

设计刚性路面厚度时,综合设计使用年限内各种车辆通过的不同轴载通过次数将其换算为标准轴载通过次数,考虑路面经受疲劳作用而要求工作应力不得超过其疲劳强度 σ_f

$$\sigma_f = \sigma_s(0.94 - 0.77\lg N_e) \quad (1-17)$$

式中: N_e ——设计使用年限内当量标准轴载通过次数。

(四) 温度应力

刚性路面直接暴露在大气之中,随着气温的改变,路面板的温度也将产生周期性的变化。由于混凝土材料的不可塑性,当温度发生变化时将伴随着产生体积变化,路面板将由此产生膨胀、收缩等变形,若路面板不能自由胀缩,受到约束,则将产生巨大的内应力,这种温度应力与荷载应力一样都是使刚性路面产生破坏的主要因素。1927年威斯德卡德提出了混凝土路面由于温度变化引起的应力分析方法,1938年布拉德伯利根据威氏公式绘制了温度应力系数曲线,使计算方法得到简化。近年来,我国学者也对刚性路面的温度变形与温度应力进行了研究,并取得了一定的进展。

一年四季气温变化的速度是缓慢的,因此路面深度范围内温度的分布是均匀的,若是路面板完全受到约束,则温度差产生的内应力为

$$\sigma_T = \alpha E_c T_n \quad (1-18)$$

式中: E_c ——混凝土弹性模量,MPa;

T_n ——施工温度与气温之差,℃;

α ——温度变形系数, $\alpha = 0.00001 / ^\circ\text{C}$ 。

若是路面板仅受地基表面摩擦力的约束,则温度应力与摩擦系数有关,即

$$\sigma = \frac{1}{2} \rho f L \quad (1-19)$$

式中: f ——板与地基之间的摩擦系数;

L ——路面板长度;

ρ ——路面板单位面积重量。

由式(1-18)、(1-19)可以推理,为保证混凝土路面板在年温差作用下不产生破坏,其温度应力 σ_t 不能超过容许的范围。

日温差的变化速率比年温差快得多,由于混凝土材料导热性的限制,在一昼夜变化周期内,路面板上下温度不可能均匀一致,这种温度梯度的存在促使温度变形沿路面板深度分布不均匀,这将导致板体翘曲变形与翘曲应力发生。

翘曲应力的计算公式极其复杂,可以写成以下简化的形式:

$$\sigma_x = \frac{E_c \alpha T_n}{2(1 - \mu_c^2)} (C_x + \mu_c C_y) \quad (1-20)$$

$$\sigma_y = \frac{E_c \alpha T_n}{2(1 - \mu_c^2)} (C_y + \mu_c C_x) \quad (1-21)$$

式中: T_n ——路面板顶面与底面温差, $^{\circ}\text{C}$;

C_x 、 C_y ——与路面板物理特性、几何特性有关的函数, 可根据 $\frac{A}{l}$ 、 $\frac{B}{l}$ 查图 1-4 得出。

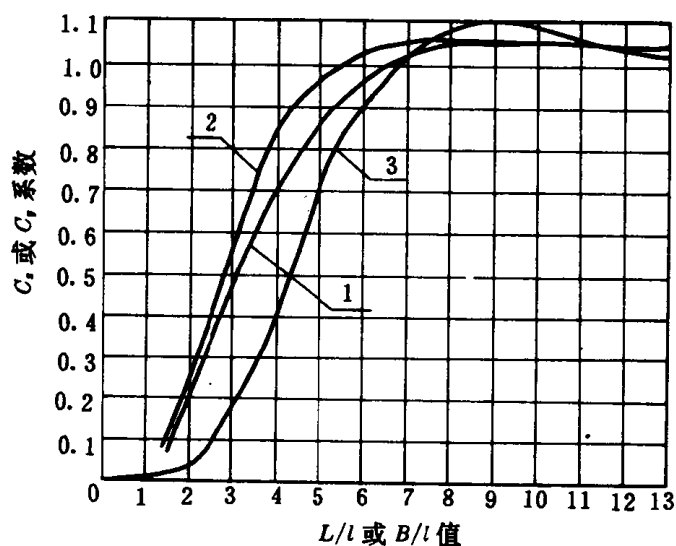


图 1-4 翘曲应力系数

设计刚性路面时应保证路面板块的划分与路面板厚度的选择都不会引起温度应力超过容许的范围。

三、刚性路面设计方法

(一) 路面结构层组合设计

水泥混凝土路面结构层组合较为简单, 一般由混凝土面板、基层或垫层组成。混凝土面板是最重要的结构层, 它直接承受车轮荷载的水平方向和垂直方向作用, 因此要求路面板具有足够的强度与一定的厚度。虽然应力分析的结果表明, 在荷载相同的情况下, 板中心受荷与板边缘受荷时应力并不相等, 但是为了便于施工, 都制成等厚式面板。当板的接缝传荷能力较好时, 可以用板中应力控制板厚设计, 否则, 应以板边应力控制板厚设计。板的初估厚度可参照表 1-1 选用。

表 1-1 混凝土面板的初估厚度

交 通 等 级	初 估 厚 度 / cm
特 重	≥ 25
重	23~25
中 等	21~23
轻	≤ 21

水泥混凝土路面基层直接位于面层板之下,是保证路面整体强度,防止唧泥和错台,延长路面使用寿命的重要结构层。选择基层类型应保证整体性好、坚实、均匀、平整、稳定,一般对特重交通和重交通的道路,宜采用稳定类半刚性基层,如水泥稳定粒料,工业废渣稳定粒料,沥青稳定粒料等基层。中等以下交通的道路,除上述类型外,还可采用石灰稳定类基层。我国现行规范规定,新建混凝土路面,一般应设置厚 0.15~0.20 m 的基层。并要求基层顶面的当量回弹模量 E_i 值不低于表 1-2 的规定。当在原有柔性路面上铺筑水泥混凝土时,原路面顶面当量回弹模量 E_i 也应符合表 1-2 的规定,若达不到规定值,应设置补强层提高当量模量,以满足规定要求。

表 1-2 基层顶面的当量回弹模量

交 通 等 级	特 重	重	中 等	轻
当量回弹模量/MPa	120	100	80	60

水泥混凝土路面垫层设置在基层与土基之间,通常是在路基排水不良或有冻胀翻浆的路段设置垫层,主要起排水、隔水、隔温、防冻和稳定土基的作用,能用于修筑基层的材料,一般也可以用于修筑垫层,但应注意垫层材料应有较好的水稳定性,在冰冻地区则应具有较好的抗冻性,并要求设置垫层后的路面结构层厚度不小于规范规定的最小抗冻厚度。

(二) 刚性路面厚度设计

刚性路面厚度设计的极限标准是以混凝土路面经受荷载重复作用所引起的疲劳应力致使路面产生断裂作为控制标准的,因此要求路面板在重复荷载作用下产生的应力 σ_p 不超过混凝土的弯拉疲劳强度 σ_f 。

荷载的疲劳作用次数是指路面设计使用年限之内,标准轴载在路面上的累计通过轴次。这里包含了路面设计使用年限内的交通量、交通组成、交通增长以及标准轴次的当量换算等因素。

刚性路面厚度设计可按以下步骤进行:

1. 确定道路等级和交通量与交通等级。交通等级的划分是以设计初期设计车道的日标准轴载数为标准的,分为特重、重、中等、轻四级。同时通过轴载当量换算的方法,将设计使用年限内考虑了交通增长预测在内的各种车辆轴载通过的累计次数,统一换算为标准轴载通过累计轴次数 N 。
2. 选定路面结构组合,初步拟定结构层厚度。路面板厚度,根据道路等级和交通等级拟定,基层、垫层结构要考虑道路等级、交通等级、当地气候、水温状况、地质土壤状况,经过技术经济论证后拟定。
3. 通过调查研究,实地勘察,室内试验,研究结构层材料的各项物理参数,其中包括混凝土面板的弹性模量 E_c ,泊松系数 μ_c ,各层的参数 E_i 、 μ_i ,土基的参数 E_0 、 μ_0 。
4. 通过室内试验确定工程选用的混凝土的标准试验抗折强度 σ_s 。
5. 计算确定水泥混凝土的弯拉疲劳强度 σ_f ,可按公式(1-17)计算得出。
6. 根据道路等级与交通等级选定动荷系数和综合系数 K_d 、 K_e 。动荷系数表示刚性路面对车轮荷载的动力效应,即反映由于轮载的动力作用给路面带来的附加影响。综合系数是考虑汽车超载、偏载和路面结构工作条件不均匀等因素带来的附加影响。
7. 验算地基顶面当量模量是否达到规定的最低要求。若验算结果不能满足要求,则调

整基层结构,或更换强度、模量较高的基层种类,或增加厚度,直至合格为止。

8. 通过查阅图表,或运行电算程序,计算标准轴载作用下,拟定的路面结构中路面板的应力 σ_p 是否小于抗弯拉强度 σ_f 。若计算结果小于 σ_f ,则满足要求,路面板厚度设计即告完成;如超过 σ_f ,超过值大于 5%,需重新选定路面板厚度,再验算应力,直至满足要求为止。

(三) 混凝土路面板平面分块及接缝设计

为防止温度应力过高引起混凝土路面板产生不规则裂缝,路面板均划分成为规则的小块,据计算,若路面板的边长为其厚度的 20~25 倍时,通常不会产生温度应力引起的裂缝,所以厚度 20~30 cm 的路面板,边长取 4.0~7.0 m 为宜,但是考虑到施工方便及地区气温、施工温度差异,一般取纵向缝的间距与车道同宽,横向接缝取 5~6 m。

横向缩缝多数做成假缝形式,对于交通特重的道路,应设置传力杆。假缝上方锯成 3~8 mm 的缝口,其深度为板厚的 1/4,缝口内容纳填缝材料,假缝下方,在使用过程中自然断开。横向胀缝宽度 20~25 mm,两侧面板用传力杆联系,以保证荷载传递,保持整体性。胀缝内以填缝材料填塞,胀缝极易损坏,一般情况可以不设,只是在混凝土路面与沥青路面相接,或者与桥梁、涵洞等结构物相接时才设置胀缝。

纵缝一般上下贯通,用拉杆相联系,以保持接缝不被拉开,以免影响路面使用品质,若是采用宽幅摊铺机铺筑路面板,纵缝也可做成假缝形式,但仍要设置拉杆,也有将纵缝做成企口缝的形式。

§ 1-2 柔性路面设计方法

一、概 述

通常把以粒料基层为主的沥青路面及一般的粒料路面称之为柔性路面。相对于刚性路面而言,柔性路面结构层材料的弹性模量及强度较低。在建造现代汽车公路的初期,路面结构厚度很薄,主要是由较薄的沥青磨耗层及用以保护路基不超载的粒料基层和底基层所组成,在车辆荷载作用之下,柔性路面结构的功能主要是扩散车轮荷载引起的集中应力,以保护土基不致产生过多的沉降,确保路面表面的平整性。本世纪 40 年代,重型卡车大量出现在公路上,早期的薄型结构已无法承受交通量的增长,柔性路面开始采用较厚的结构组合和强度较高的结构,如采用水泥、石灰、粉煤灰、沥青材料作稳定处理的基层,采用高强度的沥青混凝土组合成为 70~80 cm 厚的结构,有的国家还采用全厚式沥青路面,从而大大提高了沥青路面的整体结构刚度与整体强度,使用寿命也大为延长。自 60 年代世界发达国家大规模兴建高速公路以来,对路面的使用品质的要求更高了,要求沥青路面具有良好的平整性、抗滑性和耐磨性,以保证车辆高速行驶时,平稳、舒适、安全。因此对使用品质与功能的要求更高,甚至超过了对路面结构强度的要求。

柔性路面设计方法的发展,是随着交通的发展以及路面结构、材料不断地革新而同步发展的。由于柔性路面结构从一开始建造,其主要目的就是为保护路基土,使之不经受车辆的直接作用,通过路面传播至土基的应力被扩散而不会造成土基过大的沉降,这一点反映在设计思想及设计方法上,主要是控制土基顶面应力及垂直位移量,如 1901 年的美国麻省

(Massachusetts)道路委员会的方法,1933年的唐氏(Downs)修正公式,1934年的葛莱式(Gray)公式,1940年的哥尔德贝格(Gold Beck)公式等,都是运用古典土力学公式来验算因路面结构的存在使土基所承受的荷载应力降低的程度。

柔性路面经验设计法的提出是由于古典理论公式已无法客观地描述路面结构的实际工作状态,设计结果也无法验证。因此人们通过大量的野外测试,修筑试验路对实际车辆行驶效果进行系统观察,形成了以车辆荷载作用下确保路面结构承载能力为核心的经验设计法。如美国公路局的分类指数法(1945年),加拿大马克里奥设计法(1946年),美国陆军工程兵部队的CBR设计法(1945年),美国AASHTO设计法(1961年),以及以上述方法为基础改进的各国的经验设计方法等。经验设计法的完善为现代公路柔性路面设计提供了可靠的保证,特别是在设计极限标准、路面结构的工作状态、车辆荷载作用与重复加载效应等方面所积累的成果,使得柔性路面设计方法进入一个新的阶段。

现代理论分析设计法是以波米斯特(D. M. Burmister)1943年发表的双层体系理论解析解为起始的。鉴于经验设计法有一定的地区性和局限性,因此人们致力于研究更有普遍性或适用性的方法。生产的需要和科学技术的发展,特别是数学和计算技术的发展,推动了理论分析的逐步完善。在波米斯特1943年的论著发表之后他于1945年又提出了三层弹性体系理论。1948年福克斯(L. Fox)和汉克(Hank)给出了数值解,1951年阿堪姆(A. E. A. Acum)和福克斯等人,1962年琼斯(A. Jones)和皮蒂(K. R. Peattie)发表了三层体系实用图表,我国道路工作者自60年代以后在双层体系、三层体系数值解方面开展了大量卓有成效的研究工作。这些理论研究成果为理论解析设计法奠定了坚实的基础。

理论分析法不受经验的限制,任何新材料、新结构组合,只要符合理论分析的结果,均可提出作为选择评比方案,在技术先进、经济合理的原则之下择优选用。现在已有一些国家和地区建立了以层状体系理论为基础的柔性路面结构设计方法,其中较为完善的有英、荷壳牌石油公司、美国地沥青学会、中国、前苏联、比利时等国的方法。其它还有许多国家采纳了此方法,或者正在研究阶段。总之,理论分析法已成为柔性路面结构设计方法的发展趋势。

我国柔性路面设计方法自建国以来开展了长期系统的研究,共提出过1958年、1966年、1978年、1987年四个版本,目前研究工作仍在继续深入开展之中。我国柔性路面设计方法的总系统是以理论解析为基础的,1966年以前的方法以布辛尼斯克均质弹性半空间体系位移解析解为基础,以整体形变模量为设计指标,通过当量层等价换算方法形成了整个设计系统,并通过大规模调查形成了设计参数系列。1966年至1978年的设计方法以双层体系、双圆荷载作用下的结构垂直位移解析解为基础,以轮隙弯沉为设计指标,通过调查研究和引用国外资料形成了容许弯沉、车辆换算及参数设计系列。1987年颁布的柔性路面设计规范,又有了进一步的改善,主要特点是以三层体系,双圆荷载图式,水平、垂直荷载综合效应下的应力、位移解析解为基础,以轮隙弯沉和层底拉应力以及面层抗剪强度为设计指标。并形成了车辆换算、多层体系等价换算、考虑疲劳效应建立的容许设计指标,以及整套设计参数等。规范已成为当前指导工程设计的重要文件。所以研究工作正在以高等级公路重型沥青路面以及半刚性基层为主的沥青路面为主要对象,深入研究,并考虑了结构可靠度设计及结构优化设计等因素,研究结果将逐步纳入设计方法、规范之中。

二、柔性路面设计基本原理

(一) 基本理论与力学模型

柔性路面通常是由多层结构所组成,现代理论解析法采用了层状体系弹性理论,更能反映柔性路面的实际工作状态。经过世界各国学者 40 年的精心研究,层状体系弹性理论作为柔性路面解析法的基础已经比较完善。在求解层状结构体系时,采用四点基本假设。

1. 各层都由均质、弹性、各向同性的材料组成,弹性模量及泊松系数为 E_i 、 μ_i ;
2. 假定土基在水平方向和向下方向均为无限,土基之上各层结构的厚度均为有限,但水平方向为无限;
3. 假定路面上层表面作用有垂直均布荷载和水平均布荷载,在无限远处及无限深处,应力及位移均为零;
4. 各层次之间的接触界面,根据不同的接触情况可采用两种不同假设:
 - (1) 层间接触完全连续,其上位移完全连续;
 - (2) 层间接触完全滑动,其上剪应力为零。

根据以上四点基本假设,按柱坐标体系采用弹性力学和汉格尔(Hankel)积分变换方法,可以解出弹性层状半空间体中任意位置的应力分量及位移分量表达式,然后按照定解条件确定一般表达式中与层次有关的待定积分常数。由于表达式的组成冗长,并含有特殊函数与无穷积分式,因此,无法用简单的显式表示。只有当结构的各项弹性参数和几何参量都确定的情况下,可以算得各项系数,由图、表、电算程序完成各项计算和设计。

(二) 路面破坏的极限状态及设计指标

柔性路面结构在车辆荷载作用之下所处的工作状态及其最终出现的破坏形式是错综复杂的,通常包括裂缝、松散、拥包、波浪,以致大面积损坏等。从力学机理的角度分析,可以认为所有的各种损坏都是在车辆荷载作用下结构层中应力、应变、位移的产生并经受多次重复作用后形成的,因此在理论解析法中以主要的应力、应变、位移作为设计指标包括以下几方面:

1. 路面表面弯沉。即路表面的垂直位移。它是表征路面综合强度的一项指标,在荷载一定的条件下,各结构层的厚度及模量的大小对它都有影响,而土基的弹性模量是主要因素,通常认为弯沉的 70%~95% 决定于路基的强度。从力学分析来看,路表弯沉的分布,在双圆轮荷载的一个圆形的中心将出现最大值,而在路面设计中却采用双圆轮轮隙中心处的弯沉作为设计指标,主要是便于量测、监控。

2. 面层底部的拉应力。这是控制沥青面层不产生裂缝的重要指标。面层底部拉应力与各结构层的厚度与模量有关,面层本身的弹性模量与厚度是决定其拉应力的重要因素,而基层的厚度与模量对拉应力也极为敏感。

3. 基层底面的拉应力。采用半刚性基层修筑高等级道路沥青路面结构已在各国普遍采用。半刚性基层提高了路面结构的整体承载能力,又降低了土基承受的荷载强度,但是半刚性基层本身的底部拉应力却相对集中,若拉应力超过限度则将引起路面结构的损坏。因此,将基层底部拉应力也列入设计控制的范围。基层的弹性模量及基层的厚度将是影响其底部拉应力的重要因素。

4. 面层内的剪应力。车辆垂直荷载及水平荷载作用下面层内局部位置将产生较大剪应力,当剪应力超过材料容许范围,则产生剪切位移,结果轻则路表面形成不平整波浪,重则产生环形裂缝,面层剪应力的大小与面层的弹性模量、厚度有关,模量大则剪应力大,厚度大则剪应力小,最大剪应力的位置大约在面层厚度一半的位置。

(三) 设计轴载与轴载换算

设计标准轴载通常根据国家的经济发展水平及交通组成状况通过技术经济论证确定,我国柔性路面设计采用 100 kN 单轴双轮组为标准轴载,单个轮载为 25 kN,车轮接地应力为 0.7 MPa。

道路行驶车辆组成极其复杂,柔性路面设计采用等效当量换算方法,将各级轴载的通行次数换算为相当于标准轴通行的次数。计算公式如下:

$$n = c_i n_i \left(\frac{p_i \delta_i^{1.5}}{p \delta^{1.5}} \right)^{5.0} \quad (1-22)$$

式中: p 、 p_i 、 δ 、 δ_i ——分别为标准轴载和被换算轴载的接地轮压及其当量半径;

n_i 、 n ——分别为被换算的轴载通过次数和换算为标准轴后的通过次数;

c_i ——被换算轮载的轮组系数,双轮组为 1.0,单轮组为 0.25,一轴八轮为 4.0。

式(1-22)是我国道路工作者根据我国道路运行情况,通过分析测算,并参考国外已有成果得出的研究结论。

(四) 疲劳效应与设计指标容许值

以理论解析法为基础的柔性路面设计方法,通常以路面表面弯沉、面层底面拉应力、基层底面拉应力和面层剪应力为设计指标控制结构设计。这些指标的实有强度可以通过材料试验、小型试件测试或者通过路面结构测得,测得的指标均为一次加载作用下的状态,而实际上路面结构经受着千万次重复加载。欲保证路面结构经受设计年限内标准轴载通过的总轴次数后,仍在容许的工作状态,设计的容许指标必须包含着荷载多次反复作用的内在因素。各个国家通过反复加载疲劳试验,试验路面实地通行车辆的观察测试,以及调查资料的分析推算等方法,获得与轴载通行次数有关的设计容许指标的计算方法或计算公式。我国设计规范提出的容许设计指标公式如下:

1. 设计容许弯沉值 l_R

$$l_R = \frac{1.10}{N^{0.2}} A_c A_s \quad (1-23)$$

式中: N ——设计年限内标准轴载通行总轴次数;

A_c ——道路等级系数,通常取 0.85~1.2;

A_s ——路面类型系数,通常取 1.0~1.3。

2. 容许拉应力与结构强度系数 K_A 、 K_B

(1) 沥青面层容许拉应力 σ_{ma}

容许拉应力为沥青面层弯拉强度 σ_{ta} 除强度系数 K_A , 即

$$\sigma_{ma} = \frac{\sigma_{ta}}{K_A} \quad (1-24)$$

根据调查研究,结构强度系数 K_A 主要与荷载作用次数,即轴载通过累计数 N 有关,同