

# 柔性路面设计

梁锡三 唐有君 编著

人民交通出版社

# 柔性路面设计

梁锡三 唐有君 编著

人民交通出版社

21千

元

## 柔性路面设计

梁锡三 唐有君 编著

人民交通出版社出版  
新华书店北京发行所发行  
各地新华书店经售  
人民交通出版社印刷厂印

开本：787×1092 1/32 印张：15.25 字数：321千

1982年12月 第1版

1982年12月 第1版 第1次印刷

印数：0001—7,900册 定价：2.35元

## 前 言

随着世界各国公路运输的迅速发展，柔性路面的设计也不断地发展。本书根据国内外近二十年来的实践经验和有关柔性路面设计理论等方面的最新研究成果，其中也包括作者在这方面的研究所得和经验体会，系统地阐述了以层状体系弹性理论为基础的柔性路面结构设计原理及设计方法。全书共十三章，内容的重点是论述采用多指标设计新建路面的原理和方法，也介绍了现有路面的补强设计。对与此相关的交通因素、环境条件及材料特性的考虑方法作了较详细的叙

述。书中对体现柔性路面设计这个学科新水平的重要内容，诸如多层路面应力、应变和位移的计算方法、控制路面各种损害的设计标准、等效概念、沥青路面疲劳寿命预测、车辙深度预测和优化设计概念等等，都分别辟专门章节论述。各章有算例说明原理的具体应用，特别是最后两个例题作为一个整体，给读者提供了一个表明路面结构的耐久性与交通、环境、材料特性之间有机联系的崭新设计概念：将沥青路面的结构与沥青混合料的组成设计紧密地结合起来，如同设计水泥混凝土结构时根据材料的配比确定混凝土的强度一样。

本书提供的方法和图表能使采用多指标的柔性路面结构设计和疲劳寿命的预测等等都变得简单容易，从而易于被设计者掌握。

读者掌握了本书的内容以后，不但能进行一般的干线公

路和城市道路柔性路面的设计，而且能进行高速公路沥青路面的设计。此外，如果能熟练地应用书中所述原理，再加上相应的设计标准，也能进行机场柔性道面及行驶超重车的矿山公路路面的设计。

本书由梁锡三和唐有君共同编著，并由梁锡三主编。在编写过程中得到湖南省交通科学研究所郑继永副所长和同济大学道路与交通工程研究所林绣贤副所长的关怀及有关同志的帮助，也得到湖南省交通厅科技处及省公路局的支持。人民交通出版社还约请了一位路面专家对书稿进行了审阅，并提出了许多宝贵的修改意见和建议，作者谨此表示谢忱。由于作者的知识有限，书中缺点、错误难免，敬希读者批评指正。

作者

## 内 容 提 要

本书共十三章，重点介绍采用多指标设计新建柔性路面的原理和方法，对于现有路面的补强设计也作了介绍。

书中还附有大量例题和计算图表，便于读者应用。

本书可供广大道路工程技术人员及有关院校师生使用参考，对于初学路面设计的读者也较适用。本书也可作为培训基层技术人员的参考教材。

# 目 录

符号表	1
第一章 柔性路面设计的发展	6
§1.1 理论的发展	7
§1.2 设计方法的发展	11
§1.3 对行车因素的考虑	18
§1.4 对自然因素的考虑	22
§1.5 关于材料特性研究工作的进展	24
§1.6 测试技术的发展	25
第二章 柔性路面设计概论	29
§2.1 柔性路面的工作特性	29
§2.2 柔性路面的结构层次	31
§2.3 作用于路面的车轮荷载	34
§2.4 交通量和车辆横向分布系数	43
§2.5 作用于路面的自然因素	52
§2.6 公路自然区划	58
§2.7 例题	61
第三章 柔性路面的应力、应变和位移	67
§3.1 层状体系弹性理论的基本概念	67
§3.2 均质弹性半无限体在圆形均布垂直荷载作用下的应力、应变和位移	71
§3.3 双层弹性半无限体在圆形均布垂直荷载作用下的应力、应变和位移	77

§3.4	双层体系路面厚度计算应用图表	81
§3.5	多层体系应力、应变和位移的计算	93
§3.6	路面中应力和应变的分布及变化规律	109
§3.7	例题	128
<b>第四章</b>	<b>路面弯沉详论</b>	<b>134</b>
§4.1	弯沉的意义及量测	138
§4.2	弯沉仪的发展	144
§4.3	弯沉的简易表达式	146
§4.4	弯沉同其他指标的联系	154
§4.5	影响弯沉值的因素	159
§4.6	确定路面容许弯沉值的方法	169
§4.7	例题	174
<b>第五章</b>	<b>路面的破坏及控制标准</b>	<b>179</b>
§5.1	路面的沉陷	180
§5.2	路面的车辙	182
§5.3	路面的开裂	189
§5.4	土基的剪切破坏	198
§5.5	路面的收缩开裂	200
§5.6	路面的容许弯沉标准	201
§5.7	路面的耐用性及其指标	204
§5.8	例题	206
<b>第六章</b>	<b>等效损害原理</b>	<b>209</b>
§6.1	等效概念	210
§6.2	以弯沉为指标的等效系数公式	212
§6.3	以应力、应变为指标的等效系数公式	219
§6.4	AASHO的等效系数公式	227
§6.5	例题	228
<b>第七章</b>	<b>路面结构计算</b>	<b>230</b>



§7.1	决定路面厚度的因素	231
§7.2	以容许弯沉值为标准的路面结构计算	235
§7.3	控制车辙或沉陷的计算	241
§7.4	控制开裂的计算	243
§7.5	避免粒料基层受拉的计算	245
§7.6	控制土基剪切破坏的计算	247
§7.7	完全遵守等效损害原理的路面结构计算	249
§7.8	满足重指标的路面结构计算	251
§7.9	路面结构优化设计概要	257
§7.10	例题	259
<b>第八章</b>	<b>路面的使用寿命</b>	<b>279</b>
§8.1	迈因纳假说简介	280
§8.2	单一条件下的路面使用寿命计算	282
§8.3	状态不变的路面承受混合交通的寿命计算	283
§8.4	状态变化的路面承受混合交通的寿命计算	286
§8.5	例题	291
<b>第九章</b>	<b>现有路面的补强</b>	<b>309</b>
§9.1	补强公式的演变	310
§9.2	双层补强公式	315
§9.3	现有路面代表弯沉值的确定	317
§9.4	关于 $\beta$ 、 $m$ 和 $n$ 的影响因素	318
§9.5	关于 $\zeta$ 值的确定	321
§9.6	通过试验确定 $\beta$ 、 $m$ 和 $n$ 的方法	324
§9.7	补强设计程序	326
§9.8	例题	327
<b>第十章</b>	<b>路基土的性质和强度</b>	<b>330</b>
§10.1	公路土组和土类	331
§10.2	土基的压实标准	334

§10.3	路基干湿类型的划分	336
§10.4	土基的弹性模量及其与含水量和密实度的关系	339
§10.5	土的抗剪强度及其与含水量和密实度的关系	342
§10.6	土的应力-应变特性	346
<b>第十一章</b>	<b>路面材料的性质</b>	<b>353</b>
§11.1	材料的应力-应变特性	353
§11.2	路面材料在重复荷载作用下的永久应变规律	364
§11.3	沥青混合料的密度和空隙率	367
§11.4	沥青混合料的疲劳特性	372
§11.5	疲劳试验和动力劲度测量	376
§11.6	静力弹性模量的现场测定与动力弹性模量的间接确定	383
§11.7	例题	389
<b>第十二章</b>	<b>基层材料组成设计</b>	<b>396</b>
§12.1	粒料基层	396
§12.2	石灰土基层	405
§12.3	水泥稳定基层	414
§12.4	例题	417
<b>第十三章</b>	<b>沥青面层材料组成设计</b>	<b>421</b>
§13.1	表面处治和贯入式	422
§13.2	渣油路面	429
§13.3	沥青混凝土和黑色碎石混合料	430
§13.4	例题	443
<b>附录</b>		<b>456</b>
<b>参考资料</b>		<b>466</b>

## 符 号 表

- |   |  |
|---|--|
| <p><math>a</math> 垂直应力等效系数公式中的指数；</p> <p><math>A</math> 容许弯沉公式中的系数；</p> <p><math>b</math> 垂直应变等效系数公式中的指数；</p> <p><math>B</math> 容许垂直应力公式中的系数；</p> <p><math>B</math> 铺装宽度；</p> <p><math>c_1</math> 后轴数系数；</p> <p><math>c_2</math> 轮组数系数；</p> <p><math>c'_2</math> 后轴一侧的轮数；</p> <p><math>c</math> 土的粘聚力；</p> <p><math>C</math> 裂缝面积；</p> <p><math>C</math> 容许垂直应变公式中的系数；</p> <p><math>C_{v,a}</math> 沥青混合物中集料体积集中度；</p> <p><math>C_{v,b}</math> 沥青混合物中沥青体积集中度；</p> <p><math>C'_{v,a}</math> 改正的集料体积集中度；</p> <p><math>d</math> 双圆荷载面之一的直</p> | <p>径；</p> <p><math>d</math> 粒料的粒径；</p> <p><math>d</math> 拉应变等效系数公式中的指数；</p> <p><math>D</math> 圆形荷载面的直径；</p> <p><math>D</math> 粒料的最大粒径；</p> <p><math>D</math> 容许拉应变公式中的系数；</p> <p><math>e</math> 拉应力等效系数公式中的指数；</p> <p><math>E</math> 弹性模量；</p> <p><math>E_0</math> 土基弹性模量；</p> <p><math>E_i</math> 第 <math>i</math> 层的弹性模量；</p> <p><math>E_b</math> 沥青的劲度；</p> <p><math>E_m</math> 沥青混合料的劲度；</p> <p><math>f</math> 应力、应变和位移系数的通用符号；</p> <p><math>f</math> 表面处治层中沥青的灌填率；</p> <p><math>f_i</math> 第 <math>i</math> 级荷载的相对作用频率；</p> <p><math>f_{i1}</math> 路面处于第 <math>i</math> 种状态下承受第 <math>i</math> 级荷载的相对</p> |
|---|--|

- 作用频率；
- $F$  轮胎印迹面积；
- $F$  弯沉公式的综合修正系数；
- $g$  重力加速度；
- $G$  剪切模量；
- $G_a$  集料的平均比重；
- $G_{a_i}$  第  $i$  种集料的比重；
- $G_b$  沥青的比重；
- $h$  双层体系上层的厚度；
- $h_i$  第  $i$  层的厚度；
- $h'_i$  换算为第  $i$  层的当量厚度；
- $H$  路基高度；
- $H_1, H_2, H_3$  路基的临界高度；
- $I_L$  液性指数；
- $I_p$  塑性指数；
- $k_1$  弯沉的季节系数；
- $k_2$  湿度影响系数；
- $K$  压实系数；
- $K_w$  潮湿系数；
- $L$  后轴重；
- $m$  补强公式中的经验系数；
- $n$  一个车道年平均标准车日交通量(辆/日)对第 1 年和第  $T$  年分别用  $n_1$  和  $n_T$  表示；
- $n'$  路面全宽年平均标准车日交通量(辆/日)对第 1 年和第  $T$  年分别用  $n'_1$  和  $n'_T$  表示；
- $n_i$  第  $i$  级荷载的作用次数；
- $n_{ii}$  路面处于第  $i$  种状态下承受第  $i$  级荷载作用次数；
- $n'_i$  路面全宽年平均混合日交通量(辆/日)对于第 1 年和第  $T$  年分别用  $n'_{i1}$  和  $n'_{iT}$  表示；
- $n$  补强公式中的经验系数；
- $n$  塔尔伯特公式中的指数；
- $N$  一个车道的标准车累计交通量(辆)；
- $N'$  路面全宽标准车累计交通量；
- $N_i$  第  $i$  级荷载单独作用使路面达到破坏的作用次数；
- $N_{ii}$  路面处于第  $i$  种状态下单独承受第  $i$  级荷载直至破坏的作用次数；

$N_c$  一个车道的累计混合交通量；  
 $N_c$  路面在混合荷载下的寿命；  
 $N'_c$  路面全宽累计混合交通量对第 1 年和第  $T$  年分别用  $N'_{c1}$  和  $N'_{cT}$  表示；  
 $N_i/N_j$  第  $i$  种车辆换算为第  $j$  种车辆的等效系数；  
 $p$  轮胎对路面的压力；  
 $p'$  轮胎气压；  
 $p_d$  粒径小于  $d$  的百分率；  
 $p_a$ 、 $p_b$ 、 $p_c$  各掺配料的配合比；  
 $P$  轮重(轮荷载)；  
 $P$  修补面积；  
 PI 针入度指数；  
 Pen 针入度；  
 PSI(或  $p$ ) 耐用指数；  
 $q$  沥青混合料的全重；  
 $q_a$  沥青混合料中集料的重量；  
 $q_b$  沥青混合料中沥青的重量；  
 $q'_b$  沥青用量；  
 $q_{ai}$  沥青混合料中各种集料的重量(克)；  
 $q$  单位水平力；

$Q$  水平力；  
 $Q_a$  表面处治石料撒布量；  
 $Q_b$  油石比；  
 $Q_b$  表面处治的沥青洒布量；  
 $Q_{b0}$  考虑路面吸油的沥青洒布量修正值；  
 $r$  辐向坐标；  
 $R$  无侧限抗压强度；  
 $R_d$  车辙深度；  
 $S$  抗拉强度；  
 $S_a$ 、 $S_b$ 、 $S_c$  各掺配料中小于 0.5 毫米细料重量百分率；  
 $t$  荷载时间；  
 $T$  路面的使用年限；  
 $T$  温度；  
 $T_{RB}$  环球法软化点温度；  
 $U$  沿  $r$  轴的位移；  
 $v$  压实混合料的空隙率；  
 $v$  行车速度；  
 $V$  混合料的压实体积；  
 $V_a$  沥青混合料中集料的体积；  
 $V_b$  沥青混合料中沥青的体积；  
 $V_c$  沥青混合料中集料的体积百分率；

- $V_0$  沥青混合物中沥青的体积分率；  
 $V_1$  压实沥青混合物中空隙的体积；  
 $V_i$  第  $i$  种掺配料的松方体积；  
 $V_{ma}$  沥青混合料的骨架空隙率；  
 $V_b$  沥青混合料的沥青饱和度；  
 $w$  土基平均含水量；  
 $w_L$  土的液限；  
 $w_p$  土的塑限；  
 $w_x$  土基相对含水量；  
 $w_0$  干燥状态常见下限相对含水量；  
 $w_1, w_2, w_3$  分界相对含水量；  
 $W$  沿  $Z$  轴的(垂直)位移；  
 $\bar{W}$  垂直位移系数；  
 $W_s$  实测弯沉；  
 $W_0$  现有路面一个路段的代表弯沉；  
 $W_0'$  现有路面一个路段的平均弯沉(毫米)；  
 $W_R$  容许弯沉(厘米，补强公式用毫米)；  
 $x$  垂直坐标；  
 $\alpha$  容许垂直应力公式中的指数；  
 $\beta$  容许弯沉公式中的指数；  
 $\beta$  补强层材料参数；  
 $r$  交通量年增长率；  
 $\gamma$  路面材料的密度；  
 $\gamma$  土的干密度；  
 $\gamma$  压实沥青混合料的密度；  
 $\gamma_0$  土的最大密度；  
 $\gamma_0$  石灰土的最大干密度；  
 $\gamma_i$  第  $i$  种掺配料的松方干容重；  
 $\gamma_m$  沥青混合料的理论最大密度；  
 $\gamma_{zr}$  剪应变；  
 $\sigma$  圆形荷载面的半径；  
 $\epsilon_r$  辐向应变；  
 $\epsilon_Q$  切向应变；  
 $\epsilon_z$  垂直应变；  
 $\bar{\epsilon}_r$  辐向应变系数；  
 $\bar{\epsilon}_z$  垂直应变系数；  
 $[\epsilon_r]$  容许拉应变；  
 $[\epsilon_z]$  容许垂直应变；  
 $\epsilon_{max}$  应变振幅；  
 $\eta$  车辆横向分布系数；  
 $\eta_i$  行车道数为  $i$  的路面的

- 车辆横向分布系数;  
 $\theta$  主应力总和;  
 $\theta$  稀释沥青中溶剂含量百分率或沥青乳液中水的含量百分率;  
 $\lambda$  容许垂直应变公式中的指数;  
 $\lambda$  保证率系数;  
 $\mu_0$  路基土的泊松比;  
 $\mu_i$  第  $i$  层材料的泊松比;  
 $\xi$  容许拉应力公式中的指数;  
 $\zeta$  补强公式中的荷载系数;  
 $\rho$  容许拉应变公式中的指数;  
 $\sigma_r$  辐向应力;  
 $\sigma_\theta$  切向应力;  
 $\sigma_z$  垂直应力;  
 $\bar{\sigma}_r$  辐向应力系数;  
 $\bar{\sigma}_\theta$  切向应力系数;  
 $\bar{\sigma}_z$  垂直应力系数;  
 $[\sigma_r]$  容许拉应力;  
 $[\sigma_z]$  容许垂直应力;  
 $\sigma$  现有路面一个路段的弯沉均方差;  
 $\sigma_{(T)}$  温度应力;  
 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  主应力;  
 $\sigma_{\max}$  应力振幅;  
 $\tau_p$  有效剪应力;  
 $\tau_{rz}$  剪应力;  
 $\bar{\tau}_{rz}$  剪应力系数;  
 $\tau$  确定表面处治沥青用量时考虑沥青体积随温度而变化的系数;  
 $\phi$  应力函数;  
 $\phi$  随  $E_0/E_1$  而变化的函数;  
 $\varphi$  内摩擦角;  
 $\psi$  应力函数;  
 $\psi$  随  $E_0/E_1$  而变的函数。

# 第一章 柔性路面设计的发展

柔性路面设计在最近二十年间已经发生了很大的变化。这些都表现在设计理论、设计方法、对行车因素和自然因素的考虑、关于材料的知识和测定技术等方面。这些变化与下列因素有关：

## 一、公路运输的发展

在世界各国的经济发展中，公路运输起着极重要的作用，投资愈来愈大，朝着重型、量大、高速方向发展。特别是高速公路要求建筑行车舒适、快速、耐久的路面，这就迫使路面设计原理进一步完善。

## 二、基础理论的发展

随着弹性理论的发展，路面体系的应力应变计算这一复杂课题得到了比较完善的解答。因此柔性路面可以按复杂应力状态进行设计。理论的发展也为在设计中更精确地考虑交通条件、环境影响和材料特性创造了条件。

## 三、量测和电算技术的发展

由于量测技术的发展，人们在路面设计中就可以过细地考虑各种因素对路面性能的影响，并能较准确地测定各项参数，同时也能较准确地检验理论与实际的符合程度。利用电子计算机则可将路面设计这一受多因素影响的，包括许多复杂公式的计算工作由机器来完成。

本章概括地从路面设计的基础理论、设计方法、对行车因素和自然因素的考虑、关于筑路材料性质的研究和路面测



试技术等方面阐述柔性路面设计的发展。

## §1.1 理论的发展

任何工程结构物的设计和计算，都离不开力学模式和数学手段，柔性路面设计也不例外。从力学上讲，柔性路面受行车荷载作用时求解应力与位移问题，是一个弹性或粘弹性多层体系的动力学问题，但由于问题的复杂性，人们的认识只能逐步地接近这一模式，其中，采用过的、正在采用的和正在探讨的理论有下列几种：

### 一、静力平衡原理

最初的路面设计<sup>[1]</sup>是建立在简单的静力平衡原理基础上的。它假定车轮荷载是一个集中力（随后又看作圆形均布荷载），并按45度角通过路面传至路基，路基顶面所受的压力与容许压力相平衡。根据这样朴素的构思建立了路面厚度与荷载和土基容许压力之间的关系。这是人们对路面力学的最初认识。静力平衡原理作为路面计算问题的一个基本原则至今仍是不错的，但这种构思过于简单，用45度的荷载分布角不能确切反映土和材料的变形特性，所以后来出现了其他理论。

### 二、板体理论

某些学者注意到具有一定厚度的高强面层刚性较大，有如一快弹性板，在传递荷载时，可以减轻面层以下各层乃至土基所受的力。这种路面的作用相当于一个很厚的普通筑路材料（碎石和砂砾）层。G.约伊弗罗伊(Jeuffrey)<sup>[2]</sup>根据面层的这一特性提出了一种板体理论。他将面层当作弹性板（在垂直方向是不可压缩的），基层和土基则当作弹性层，绘制了面层拉应力、土基垂直应力和表面弯沉的诸模图供设计