

# 高等水泥混凝土路面 设计理论与方法

黄卫 钱振东 著



科学出版社

## 内 容 简 介

本书介绍了多种类型高等级水泥混凝土路面的设计理论及设计方法。内容包括：各类水泥砼路面的载荷应力、温度翘曲应力的理论分析和数值计算，连续配筋混凝土路面设计，预应力混凝土路面设计，锁块路面设计，复合式路面与罩面设计等。此外，还介绍了水泥砼路面养护与评价原则。

本书包括了大量的最新科研成果和工程经验，内容丰富，叙述简明，可供从事道路及机场道面的研究及工程技术人员参考，也可作为有关专业研究生教材或参考书。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

高等水泥混凝土路面设计理论与方法/黄卫，钱振东等著. -北京：科学出版社，2000. 1

ISBN 7-03-007841-1

I. 高… II. ①黄…②钱… III. 水泥混凝土路面，高级-设计 IV. U416.216

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 37431 号

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号  
邮政编码：100717

科 地 亚 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

2000 年 1 月 第 一 版 开本：850×1168 1/32  
2000 年 1 月 第 一 次 印 刷 印张：14 3/4  
印数：1—2 500 字数：381 000

定价：25.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换〈新欣〉)

# Theory and Methodology of High-Class Concrete Pavement Design

Huang Wei & Qian Zhendong

## 前 言

随着我国经济建设的迅速发展，公路运输事业突飞猛进，高等级公路里程快速增长，同时由于高速、重载交通比重的增加，对高等级公路路面的使用性能提出了更高的要求。针对我国优质路用沥青的不足和水泥资源相对丰富，以及水泥混凝土路面研究取得的可喜成果，将水泥混凝土路面应用于高等级公路是我国公路发展的一个重要策略。

普通水泥混凝土路面由于板长限制，需预留伸缩缝，然而接缝处易产生唧泥、错台、拱起等问题，因此，伸缩缝成为水泥混凝土路面的薄弱位置。为克服普通水泥混凝土路面的各种不足因素，改善路面使用性能，自 80 年代末开始，我国开始研究各种特殊水泥混凝土路面结构形式，如连续配筋水泥混凝土路面、预应力路面、复合式路面等。

本书根据作者多年从事有关科研工作、研究生培养以及东南大学交通学院等的最新科研成果编写而成，书中系统介绍了多种类型高等级水泥混凝土路面的设计理论和方法，并适当介绍了国外有关路面设计理论、设计方法的发展现状。

第一章水泥混凝土路面结构与力学特性，阐述了温克勒地基和弹性半空间地基上水泥混凝土路面载荷应力和温度翘曲应力的理论分析。第二章水泥混凝土路面的数值计算，研究用有限元方法和有限棱柱法分析计算薄板、厚板和空心厚板水泥混凝土路面的载荷应力和温度翘曲应力，并编制了相关程序。第三章水泥混凝土路面设计方法，主要介绍我国新编规范（JTJ012-94）中的水泥混凝土设计方法及美国著名的 AASHTO 法和波特兰水泥协会法。第四章连续配筋水泥砼路面设计，研究连续配筋水泥砼路面的应力分析和结构设计，介绍了东南大学交通学院和协作单位

共同承担的试验路的铺筑和试验成果。第五章预应力混凝土路面设计, 针对预应力路面的结构和设计特点, 在国内外首次采用 20 结点三维等参数有限元方法进行预应力混凝土路面的应力分析, 介绍作者在“九五”重点科技项目和江苏省交通设计院共同承担的国内第一条预应力混凝土试验路的设计、初期观测结果。第六章锁块路面设计, 介绍国内外锁块路面的结构承载理论、设计方法及铺设规范。第七章复合式路面与罩面设计, 介绍东南大学交通学院在国家“八五”重点科技项目“高等级公路碾压混凝土路面结构设计理论与方法的研究”中提出的考虑温度与荷载综合作用的 RCC+AC 路面结构设计方法, 同时介绍了旧混凝土路面上的几种加厚层设计。第八章水泥混凝土路面养护与评价, 结合国内外相关资料, 研究水泥砼路面养护及其经济效果分析, 路面信息采集分析和路面评价标准。

本书是国内第一部论述多种类型水泥混凝土路面设计理论与方法的书籍, 可供从事道路和机场工程科研、教学和工程设计人员参考使用, 也可作为相关专业研究生教材或学习参考书。希望本书对我国水泥混凝土路面的推广应用以及国际间技术交流合作起到积极作用。

限于作者的水平, 书中难免会有错误和不当之处, 敬请读者批评指正。

黄 卫

1999 年 4 月

## Preface

With the rapid development of economy, China has made significant progress in its highway construction and transportation. The distance of high-class highways increases fast, and in the meantime, the increase in the high-speed, heavy-load transportation raises a demand for higher service performance of the high-class highway pavement. Considering the fact that our country is short of high-quality asphalt, but has abundant cement resources, along with great achievements made in the research of the concrete pavement, the utilization of concrete for the high-class highway pavement will be an important strategy for developing highways in China.

Due to the limit of the slab length, the common concrete pavement needs to reserve joints. Such defects as pumping, faulting, deflection, etc., tend to occur at the joints, which are greatly weakened as a result. To solve these and other problems and improve the pavement service performance, since the end of 1980 some special structural forms of concrete pavement have been developed in China, such as the continuously reinforced concrete pavement, prestressed concrete pavement, composite pavement and so on. This book is based on our long-term research and teaching experience as well as on the latest engineering achievements from the researches conducted by Transportation College of Southeast University. The theories and methods of designing different kinds of high-class concrete pavement are presented systematically, along with a brief introduction of the recent development of the pavement-design theories and methods abroad.

This book is divided into 8 chapters. Chapter 1 is concerned with the theoretical analysis of the load stress and temperature warping stress of the concrete pavement on the Winkler foundation and elastic semi-space foundation. Chapter 2 discusses the numerical analysis of the concrete pavement and the development of the relative computer programs of the finite element and finite prism method for calculating the load stress and temperature stress of plate, block and hollow block concrete pavements. Chapter 3 introduces the new Chinese Standards JTJ012-94, the American AASHTO standards and Portland Cement Association's PCA standards for designing concrete pavements. Chapter 4 is concerned with the stress analysis and structural design of the continuously reinforced concrete pavement as well as the construction (and its achievements) of the experimental road undertaken by Transportation College of Southeast University and other cooperating departments. Chapter 5, based on the structural and design features of the prestressed concrete pavement, presents a 20-node three-dimensional isoparameter finite element method for analyzing the stress of the prestressed concrete pavement, and looks at the design and preliminary observation of the first prestressed concrete section - one of the key projects of China's "Ninth-Five-Year Program" undertaken by the authors and Transportation Design Institute of Jiangsu Province. Chapter 6 deals with the world's structural loading theory, design methods and paving standards for the interlocking concrete pavement. Chapter 7 presents the method for the RCC + AC pavement structure design in view of the coaction of temperature and load, which was developed by Transportation College of Southeast University in a key project of China's "Eighth-Five-Year Program" entitled "Research on Theory and Methods of High-Class Clashed Concrete Pavement Design". Chapter 7 also includes different designs of the overlay on existing

concrete pavements. And Chapter 8 examines the maintenance and evaluation of concrete pavements, the evaluation standards, and the collection and analysis of pavement information.

This book is characterized by its pioneering effort to integrate different theories and methods of the concrete pavement design. It is designed to provide reference for researchers, teachers and engineers specializing in the highway & airport pavement design. It can also be used as a textbook or reference book for graduate students majoring in it. It is hoped that this book can help to further the application of the concrete pavement in China, and promote international exchanges in this field.

We would appreciate criticism and suggestions from our readers.

Huang Wei  
Southeast University  
April, 1999



# 目 录

<b>第一章 水泥混凝土路面结构与力学特性</b> .....	( 1 )
第一节 概 述 .....	( 1 )
第二节 弹性薄板与地基假定 .....	( 2 )
第三节 温克勒地基的水泥混凝土路面荷载应力分析 .....	( 9 )
第四节 弹性半空间地基的水泥混凝土路面荷载应力 分析 .....	( 21 )
第五节 水泥混凝土路面的温度翘曲应力 .....	( 47 )
参考文献 .....	( 56 )
<b>第二章 水泥混凝土路面的数值计算</b> .....	( 57 )
第一节 概 述 .....	( 57 )
第二节 弹性地基薄板的有限元分析 .....	( 60 )
第三节 弹性地基厚板和空心厚板混凝土路面的三维 等参数有限元分析 .....	( 72 )
第四节 弹性地基厚板和空心厚板混凝土路面的有限 棱柱法 .....	( 86 )
第五节 多板系统混凝土路面的有限元分析 .....	( 104 )
第六节 混凝土路面的温度应力分析 .....	( 109 )
第七节 混凝土路面板与地基接触状况的有限元分析 .....	( 114 )
第八节 混凝土路面应力分析有限元程序 CPSAP 说明 .....	( 119 )
参考文献 .....	( 133 )
<b>第三章 水泥混凝土路面设计方法</b> .....	( 136 )
第一节 概 述 .....	( 136 )

第二节	我国水泥混凝土路面设计原理及方法 .....	( 138 )
第三节	波特兰水泥协会法 .....	( 169 )
第四节	AASHTO 法 .....	( 189 )
	参考文献 .....	( 204 )
<b>第四章</b>	<b>连续配筋水泥砼路面设计 .....</b>	<b>( 206 )</b>
第一节	概 述 .....	( 206 )
第二节	CRCP 的荷载应力分析 .....	( 213 )
第三节	连续配筋水泥砼路面结构设计 .....	( 238 )
第四节	混凝土配合比设计 .....	( 258 )
第五节	连续配筋混凝土试验路施工与初期观测 ..	( 263 )
	参考文献 .....	( 270 )
<b>第五章</b>	<b>预应力混凝土路面设计 .....</b>	<b>( 272 )</b>
第一节	概 述 .....	( 272 )
第二节	预应力混凝土路面应力分析的有限元法 ..	( 280 )
第三节	预应力混凝土路面的应力分析 .....	( 291 )
第四节	预应力混凝土路面设计 .....	( 309 )
第五节	预应力混凝土试验路的施工及测试 .....	( 328 )
	参考文献 .....	( 337 )
<b>第六章</b>	<b>锁块路面设计 .....</b>	<b>( 339 )</b>
第一节	概 述 .....	( 339 )
第二节	锁面路面的结构承载 .....	( 351 )
第三节	混凝土锁块路面设计 .....	( 358 )
第四节	锁块路面的铺设及规范 .....	( 367 )
	参考文献 .....	( 372 )
<b>第七章</b>	<b>复合式路面与罩面设计 .....</b>	<b>( 375 )</b>
第一节	概 述 .....	( 375 )
第二节	碾压混凝土与沥青混凝土复合式路面的结构 设计 .....	( 382 )
第三节	复合式路面的罩面设计方法 .....	( 399 )
第四节	旧水泥混凝土路面水泥混凝土加厚层设计	

.....	( 402 )
第五节 钢纤维混凝土加铺层设计 .....	( 411 )
参考文献 .....	( 413 )
<b>第八章 水泥混凝土路面养护与评价 .....</b>	<b>( 415 )</b>
第一节 概 述 .....	( 415 )
第二节 水泥混凝土路面的使用状况及恶化状况 ...	( 416 )
第三节 路面维修和养护 .....	( 419 )
第四节 混凝土路面评价的一般原则 .....	( 428 )
第五节 信息的采集与分析 .....	( 434 )
第六节 控制路段的分析 .....	( 447 )
参考文献 .....	( 452 )

# Contents

## Preface

### **1 STRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE PAVEMENT**

- 1.1 Introduction
- 1.2 Assumptions of Elastic Slabs and Foundation
- 1.3 Analysis of Load Stress of Concrete Pavement on the Winkler Foundation
- 1.4 Analysis of Load Stress of Concrete Pavement on Elastic Semi-space Foundation
- 1.5 Analysis of Temperature Warping Stress of Concrete Pavement

References

### **2 NUMERICAL ANALYSIS OF CONCRETE PAVEMENT**

- 2.1 Introduction
- 2.2 Finite Element Analysis of Slabs on Elastic Foundation
- 2.3 Three-Dimensional Isoparameter Finite Element Analysis of Block and Hollow Block Concrete Pavements on Elastic Foundation
- 2.4 Finite Prism Method for Block and Hollow Block Concrete Pavements on Elastic Foundation
- 2.5 Finite Element Analysis of Concrete Pavement of Multi-Slab System
- 2.6 Analysis of Temperature Warping Stress of Concrete Pavement
- 2.7 Finite Element Analysis of Slab-Subgrade Contact

## 2.8 Description of CPSAP

References

### **3 METHODOLOGY OF CONCRETE PAVEMENT DESIGN**

#### 3.1 Introduction

#### 3.2 Principles and Methods for Concrete Pavement Design in China

#### 3.3 PCA Methods

#### 3.4 AASHTO Methods

References

### **4 DESIGN OF CONTINUOUSLY REINFORCED CONCRETE PAVEMENT (CRCP)**

#### 4.1 Introduction

#### 4.2 Stress Analysis of CRCP

#### 4.3 Structural Design of CRCP

#### 4.4 Design of Concrete Aggregate Proportioning

#### 4.5 Construction and Preliminary Observation of Experimental Road of Continuously Reinforced Concrete

References

### **5 DESIGN OF PRESTRESSED CONCRETE PAVEMENT**

#### 5.1 Introduction

#### 5.2 Finite Element Analysis of Stress of Prestressed Concrete Pavement

#### 5.3 Stress Analysis of Prestressed Concrete Pavement

#### 5.4 Design of Prestressed Concrete Pavement

#### 5.5 Construction and Observation of Experimental Road of Prestressed Concrete Pavement

References

### **6 DESIGN OF INTERLOCKING CONCRETE BLOCK PAVEMENT**

#### 6.1 Introduction

- 6.2 Structural Loading of Interlocking Concrete Block Pavement
- 6.3 Design of Interlocking Concrete Block Pavement
- 6.4 Standard Specification for Construction of Interlocking Concrete Block Pavement

References

## **7 DESIGN OF COMPOSITE PAVEMENT AND OVERLAY**

- 7.1 Introduction
- 7.2 Structural Design of Composite Pavement of Clashed Concrete and Asphalt Concrete
- 7.3 Methods for Composite Pavement Overlay Design
- 7.4 Design of Concrete Overlay on Existing Concrete Pavements
- 7.5 Design of Steel-Fiber Concrete Overlay

References

## **8 MAINTENANCE AND EVALUATION OF CONCRETE PAVEMENT**

- 8.1 Introduction
- 8.2 Behavior and Deterioration of Concrete Pavement
- 8.3 Pavement Maintenance and Economical Feasibility Analysis
- 8.4 General Principles of Concrete Pavement Evaluation
- 8.5 Collection and Analysis of Information
- 8.6 Analysis of Control Sections

References

# 第一章 水泥混凝土路面结构与力学特性

## 第一节 概 述

路面可分为三种主要类型:柔性路面(沥青路面)、刚性路面(水泥混凝土路面)和复合式路面。水泥混凝土路面通常称为混凝土路面,属刚性路面。混凝土路面可以分为四类:有接缝的普通混凝土路面(Jointed Portland Concrete Pavement,简称为 JPCP),有接缝的钢筋混凝土路面(Jointed Reinforced Concrete Pavement,简称为 JRCP),连续配筋混凝土路面(Continuously Reinforced Concrete Pavement,简称为 CRCP)以及预应力混凝土路面(Prestressed Concrete Pavement,简称为 PCP)。除了横向预加应力的 PCP 外,其它类型路面在两个行车道之间应设置纵缝,以防止纵向裂缝。

刚性路面的典型断面和柔性路面不同,结构组合较柔性路面简单,一般由混凝土面板、基层或垫层组成。由于路面板具有较高的承载和扩散荷载的能力,因此,水泥混凝土路面对各结构层次的要求也与沥青类路面有较大的区别。

作为刚性路面的水泥混凝土路面,同柔性路面相比,有其特殊性。首先,混凝土路面板的弹性模量及力学强度大大高于基层和土基的相应模量和强度;其次,混凝土的抗弯强度远小于抗压强度,约为其  $1/6 \sim 1/7$ ,因此决定水泥混凝土板尺寸的强度指标是抗弯拉应力;由于混凝土板与基层或土基之间的摩擦力一般不大,刚性路面存在有接缝,所以在力学图式上把水泥混凝土路面结构看作是弹性地基板,它的分析采用板体理论,一般不用层状理论。板体理论是层状理论的简化模型。如果车轮荷载作用在板中,无论是板体理论,还是层状理论均可采用,两者将得到几乎相同的弯拉应力和应变<sup>[1]</sup>。如果荷载作用在板边,假定离板边距离小于

0.6m,一般只能用板体理论分析刚性路面。

混凝土路面是以水泥混凝土板作为主要承受荷载的结构层,应力在其内部沿深度消散很快,而基层承受的应力很小,起着支承作用。由于混凝土是脆性材料,其抗弯拉强度比抗压强度低得多,在车轮荷载作用下当弯拉应力超过混凝土的极限抗弯拉强度时,混凝土板便产生断裂破坏。且在车轮荷载的重复作用下,混凝土板会在低于其极限抗弯拉强度时出现破坏。此外,由于板顶面和底面的温差会使板产生温度翘曲应力,板的平面尺寸越大,翘曲应力也越大。在荷载作用下土基和基层的变形情况对混凝土板的影响很大,不均匀的基础变形会使混凝土板与基层脱空,在车轮荷载作用下板产生过大的弯拉应力而遭破坏。为使路面能够经受车轮荷载的多次重复作用,抵抗温度翘曲应力,并对地基变形有较强的适应能力,混凝土板必须具有足够的抗弯强度和厚度。

考虑到混凝土路面板的厚度不到其平面尺寸的十分之一,荷载作用下板的挠度又远小于其厚度,因此,刚性路面的构造和工作状态符合薄板小挠度理论。目前的刚性路面应力分析,大多是以弹性地基上的薄板为模式。弹性地基包括温克勒(Winkler)地基,弹性均质半空间地基与弹性层状半空间地基。

## 第二节 弹性薄板与地基假定

### 一、小挠度弹性薄板的基本假设

小挠度弹性薄板弯曲理论,是以三个计算假定为基础的。取薄板的中面为  $xy$  面,这些假定如下:

(1)垂直于中面方向的正应变  $\epsilon_z$  极其微小,可以不计。取  $\epsilon_z = 0$ ,则由弹性力学中的几何方程得  $\frac{\partial w}{\partial z}$ ,从而得

$$w = w(x, y) \quad (1-1)$$

竖向位移(即挠度)  $w$  仅是平面坐标  $(x, y)$  的函数,即沿板厚度各点具有相同的挠度  $w$ 。



(2) 应力分量  $\tau_{zx}$ ,  $\tau_{zy}$  和  $\sigma_z$  远小于其它三个应力分量, 因而是次要的, 它们所引起的形变可以不计。因为不计  $\tau_{zx}$  及  $\tau_{zy}$  所引起的形变, 所以有

$$\gamma_{zx} = 0, \quad \gamma_{zy} = 0 \quad (1-2)$$

因为不计  $\sigma_z$  所引起的形变, 所以由物理方程有

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{1}{E}(\sigma_x - \mu\sigma_y) \\ \epsilon_y &= \frac{1}{E}(\sigma_y - \mu\sigma_x) \\ \gamma_{xy} &= \frac{2(1+\mu)}{E}\tau_{xy} \end{aligned} \quad (1-3)$$

由于  $\epsilon_z = 0, \gamma_{zx} = 0, \gamma_{zy} = 0$ , 可见中面的法线在薄板弯曲时保持不伸缩, 并且成为弹性曲面的法线。

(3) 薄板受到垂直于板面的荷载时, 中面各点都没有平行于板面的位移, 即

$$(u)_{z=0} = 0, \quad (v)_{z=0} = 0 \quad (1-4)$$

也就是说, 中面的任意一部分, 在弯曲成弹性曲面前后, 在  $xy$  面上的投影形状保持不变。在上述公式中,  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  分别表示  $x, y, z$  方向的正应力分量;  $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$  分别表示  $x, y, z$  方向的正应变分量;  $u, v, w$  分别表示  $x, y, z$  方向的位移分量;  $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$  分别表示三个方向的剪应力分量;  $\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$  分别表示三个方向的剪应变分量;  $E, \mu$  分别表示材料的弹性模量与泊松比。

对弹性地基薄板、板与地基的接触状态又采用了如下假设:

(1) 在变形过程中, 板与地基的接触面是吻合的, 即板底面与地基表面的竖向位移是相同的;

(2) 在板与地基的两接触面之间没有摩阻力(可以自由滑动), 即接触面上的剪应力视为零。

## 二、板挠曲面微分方程

从板上割取长和宽各为  $dx$  和  $dy$  高为  $h$  的单元, 作用于单元