

路面结构设计 及数值分析软件应用

武汉市政工程设计研究院有限责任公司

赵彬强 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

赵彬强 著



扫码下载阅读书中各项详细计算数据、成果文件及程序代码等。



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书主要介绍路面结构设计及数值分析软件应用,包括路面结构设计方法、BISAR 软件与路面结构分析、EverStressFE 1.0 柔性路面计算软件与路面结构分析、EverFE 2.25 软件与路面结构分析、URPDS 软件与路面结构分析、ABAQUS 有限元软件与路面结构分析、Qorigin 8.0 软件与路面结构分析。书中从路面结构设计原理角度对我国现行《城镇道路路面设计规范》《公路水泥混凝土路面设计规范》等进行解读,利用相关软件进行路面结构计算及其参数、模型选择对比分析,提高道路工程相关专业人员的研究、分析及应用能力。

本书可作为道路工程相关专业科研、设计、施工人员及研究生学习参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

路面结构设计及数值分析软件应用/赵彬强著. —北京:中国电力出版社, 2017.12

ISBN 978-7-5198-1510-3

I. ①路… II. ①赵… III. ①路面—结构设计—应用—软件②路面—结构分析—应用软件 IV. ①U416-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 304580 号

出版发行:中国电力出版社

地 址:北京市东城区北京站西街 19 号(邮政编码 100005)

网 址:<http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑:熊荣华(010-63412543)

责任校对:常燕昆

装帧设计:赵姗姗

责任印制:吴 迪

印 刷:北京雁林吉兆印刷有限公司

版 次:2017 年 12 月第一版

印 次:2017 年 12 月北京第一次印刷

开 本:787 毫米×1092 毫米 16 开本

印 张:16.25

字 数:394 千字

定 价:60.00 元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

前言

路面结构主要由面层、基层、底基层、功能层（垫层）等多层结构组成。行驶在路面上的车辆，通过车轮把荷载传递给路面，再由路面传递给路基，使路基路面结构内部产生应力、应变及位移。早期的道路工程分析建立在观察和经验的基础上，经过长期的努力，逐渐由经验为主的方法演变为结构分析理论为主的方法。

随着沥青路面和水泥路面的大量使用，研究人员对沥青材料 and 水泥混凝土材料进行了较为系统地研究，形成了适用于沥青路面分析研究的柔性路面设计理论和方法、刚性路面设计理论和方法、半刚性路面设计技术等。我国现行规范，沥青路面设计方法主要采用双圆垂直均布荷载作用下的多层弹性体系理论；水泥混凝土路面设计方法主要采用单轴双轮组 100kN 标准轴载作用下的弹性半空间地基有限大矩形薄板理论有限元解为理论基础。目前常用软件均是以这两种理论基础为依据，结合我国实际情况进行运用的。

随着大型土木工程和现代工业的发展，很多先进的材料、路面结构在道路工程中得到了应用。为了更加周全地考虑这些因素的影响，需要更加合理地分析，这就对我们的设计研究人员提出了更为严峻的挑战，不仅要会使用相关软件，同时也要合理选择参数，建立模型。

本书主要介绍路面结构设计及数值分析软件应用，包括路面结构设计方法、BISAR 软件与路面结构分析、EverStressFE 1.0 柔性路面计算软件与路面结构分析、EverFE 2.25 软件与路面结构分析、URPDS 软件与路面结构分析、ABAQUS 有限元软件与路面结构分析、Qorigin 8.0 软件与路面结构分析等。

本书正文中提到的附件内容已作为数字资源提供下载，下载请扫描下面微信二维码。

本书由武汉市政工程设计研究院有限责任公司赵彬强撰写完成。由于路面结构设计及计算方法还处于发展完善阶段，我们的研究是基于当前的理论及计算方法开展的，限于作者的认识水平和分析能力，书中内容若有不确切和不足之处，恳请读者提出宝贵意见。

作者

2017 年 12 月



扫描下载阅读书中各项详细计算数据、
成果文件及程序代码等。

目 录



前言

扫码下载阅读书中各项详细计算数据、
成果文件及程序代码等。

绪论	1
1 路面结构设计方法	3
1.1 路面结构设计方法简介	3
1.1.1 设计方法类型	3
1.1.2 路面设计要素	4
1.1.3 沥青路面设计方法	14
1.1.4 水泥混凝土路面设计方法	25
1.2 路面结构力学模型	31
1.3 路面结构设计计算软件	33
2 BISAR 软件与路面结构分析	36
2.1 BISAR 软件总体介绍	36
2.2 BISAR 软件模块及功能	36
2.2.1 主菜单	36
2.2.2 打开及编辑数据	37
2.2.3 删除数据	37
2.2.4 读取和删除现有数据	38
2.2.5 数据维护	38
2.2.6 保存项目和运算	38
2.3 新建城市道路路面结构计算分析	40
2.3.1 以路表弯沉为设计指标沥青路面结构计算	40
2.3.2 以半刚性基层层底拉应力为设计指标沥青路面结构计算	46
2.3.3 有关说明	53
2.4 路面竣工验收弯沉值 f_0 计算	54
2.4.1 以设计弯沉值作为控制指标	54
2.4.2 以半刚性基层层底弯拉应力作为控制指标	56

2.5	BISAR 层间结合状态计算分析	57
2.5.1	理论背景	57
2.5.2	层间结合状态对沥青路面设计的影响计算	58
3	EverStressFE 1.0 柔性路面计算软件与路面结构分析	67
3.1	EverStressFE 1.0 软件总体介绍	67
3.1.1	软件简介	67
3.1.2	软件主要特点	67
3.2	EverStressFE 1.0 软件模块及功能	70
3.2.1	EverStressFE 1.0 基本组成	70
3.2.2	EverStressFE 1.0 软件分析流程	71
3.2.3	EverStressFE 1.0 基本使用方法	71
3.3	柔性路面结构计算分析	79
3.3.1	柔性路面结构计算分析实例	79
3.3.2	EverStressFE 中间层结合状况评价	86
4	EverFE 2.25 软件与路面结构分析	90
4.1	EverFE 2.25 软件总体介绍	90
4.1.1	EverFE 2.25 软件主要特点	90
4.1.2	单元类型	91
4.1.3	面层与基层间界面模型	91
4.1.4	传力杆和拉杆单元模型	93
4.1.5	集料嵌锁作用模拟	94
4.1.6	对轴载作用及温度影响的处理	95
4.1.7	地基反应模量 k 确定	97
4.2	EverFE 2.25 软件模块及功能	97
4.2.1	EverFE 2.25 基本组成	97
4.2.2	EverFE 2.25 基本使用方法	99
4.3	轮载作用下水泥混凝土路面荷载应力计算	106
4.3.1	温克勒地基板的荷载应力分析	106
4.3.2	水泥混凝土路面荷载应力计算实例	109
4.3.3	EverFE 2.25 分析结果与 Westergaard 解分析对比	113
4.4	温度梯度作用下水泥混凝土路面温度应力分析	116
4.4.1	路面温度梯度	116
4.4.2	水泥混凝土路面温度应力分析	116
4.4.3	温度梯度作用下水泥混凝土路面温度应力分析实例	118
4.4.4	EverFE 2.25 分析结果与 Westergaard-Bradbury 公式分析对比	122
4.5	温度荷载和车辆荷载共同作用下板的应力响应分析	123
4.5.1	水泥混凝土路面接缝工作状态	124

4.5.2	问题描述	126
4.5.3	路面结构模型几何建立	127
4.5.4	材料及模型参数确定	128
4.5.5	荷载定义	128
4.5.6	传力杆及拉杆定义	129
4.5.7	集料嵌锁定义	130
4.5.8	网格划分	130
4.5.9	模型计算及后处理	130

5 URPDS 软件与路面结构分析

5.1	URPDS 2012 软件总体介绍	137
5.1.1	软件概况	137
5.1.2	主要计算内容	137
5.1.3	主菜单介绍	137
5.2	新建沥青路面结构设计	139
5.2.1	基本资料	139
5.2.2	初拟路面结构	139
5.2.3	材料参数确定	140
5.2.4	路面结构计算	140
5.2.5	计算结果	145
5.3	路面竣工验收	145
5.3.1	原始数据输入	146
5.3.2	计算类型与计算内容	146
5.3.3	路面结构参数	146
5.3.4	路面竣工验收验算	146
5.4	改建路段旧路面当量回弹模量计算程序 (UOC)	147
5.4.1	现有路面结构状况调查	147
5.4.2	弯沉评定	148
5.4.3	加铺层设计	149
5.4.4	需要注意的问题	151
5.4.5	改建路段旧路面当量回弹模量计算实例	152

6 ABAQUS 有限元软件与路面结构分析

6.1	ABAQUS 有限元软件总体介绍	156
6.2	ABAQUS 有限元软件基本知识	156
6.2.1	ABAQUS 产品组成	156
6.2.2	ABAQUS/CAE 简介	157
6.2.3	ABAQUS/CAE 分析模块 (Module)	159

6.3	沥青混凝土路面受力分析	171
6.3.1	路面结构方案及模型建立	171
6.3.2	路面结构计算及分析	172
6.4	水泥混凝土路面结构分析	187
6.4.1	路面结构方案及模型建立	187
6.4.2	路面结构计算及分析	189
7	Origin 8.0 软件与路面结构分析	204
7.1	Origin 8.0 软件总体介绍	204
7.1.1	Origin 8.0 软件主要功能	205
7.1.2	Origin 帮助文件	205
7.1.3	预留接口	205
7.1.4	软件工作环境	207
7.2	极端天气数据分析	208
7.2.1	项目背景	208
7.2.2	NOAA 气温、降雨数据搜集	208
7.2.3	导出数据分类	212
7.2.4	Origin 绘制气温数据图	213
7.3	沥青混合料时温等效原理中数据分析应用	217
7.3.1	时间温度换算法则	217
7.3.2	移位因子计算方法	217
7.3.3	Burgers 模型	218
7.3.4	Maxwell 模型	219
7.3.5	蠕变试验及图形绘制	220
7.3.6	蠕变柔量主曲线计算	224
7.3.7	蠕变柔量主曲线非线性拟合	229
7.4	Origin 在道路工程数据分析其他应用	234
7.4.1	沥青路面温度场分布规律图形绘制	234
7.4.2	Origin 在道路工程数据分析中常用功能介绍	239
7.4.3	曲线图转数据工具软件应用	247
	参考文献	250

绪 论

路面结构设计理论系统探索是从 20 世纪 20 年代开始的, 之前的路面结构基本凭经验设计, 路面结构形式和厚度大都未考虑环境和地质条件的影响。随着科学领域的发展, 针对路面结构力学问题和物理问题, 人们已经得到了它们应遵循的基本方程(常微分方程或偏微分方程)和相应的定解条件, 但能用解析法求解精确解的只是少数方程性质简单的问题, 而路面结构分析中若考虑温度、荷载等非线性问题时, 则不能得到精确解。随着计算机技术的发展, 数值方法已成为求解科学技术问题的主要工具。

(1) 有限元分析方法。

有限元法是数值分析方法的一种, 其基本思想是将连续的求解区域离散为一组有限个且按一定方式相互连接在一起的单元组合体。由于单元能按不同的连接方式进行组合, 且单元本身又可以有不同形状, 因此可以模拟几何形状复杂的求解域。有限单元法作为数值分析方法的另一个重要特点是, 利用在每一个单元内假设的近似函数来分片地表示全求解域上待求的未知场函数。单元内的近似函数通常由未知场函数或其导数在单元的各个结点的数值和其插值函数来表达。这样一来, 在一个问题的有限元分析中, 未知场函数或其导数在各个结点上的数值就成为新的未知量(也即自由度), 从而使一个连续的无限自由度问题变成离散的有限自由度问题。求解出这些未知量, 就可以通过插值函数计算出各个单元场函数的近似值, 从而得到整个求解域上的近似解。显然, 随着单元数目的增加, 也即单元尺寸的缩小, 或者随着单元自由度的增加及插值函数精度的提高, 不断改进解的近似程度。如果单元是满足收敛要求的, 近似解最后将收敛于精确解。

有限元法已广泛应用于机械工程、土木工程、微电子、电磁场、生物力学等领域, 以其强大的功能成为解决工程问题的强有力工具。在道路工程领域中, 采用有限元分析方法可以大大简化试验流程, 减少人力、物力的消耗。目前市面上路面结构有限元分析软件比较多, 如 BISAR、EverStressFE 1.0、EverFE 2.25、EVERCALC、ABAQUS 等。

随着计算机技术和有限元方法的发展, 作为一个具有稳固理论基础和广泛应用的数值分析工具, 有限元法将在国民经济建设和路面科学技术发展中发挥更大的作用。

(2) 路面结构与有限元分析方法。

路面结构主要由面层、基层、底基层、功能层(垫层)等多层结构组成。行驶在路面上的车辆, 通过车轮把荷载传递给路面, 由路面传递给路基, 在路基路面结构内部产生应力、应变及位移。早期的道路工程分析建立在观察和经验的基础上, 经过长期的努力, 逐渐由经验为主的方法演变为结构分析理论为主的方法。

随着沥青路面和水泥路面的大量使用, 研究人员对沥青材料 and 水泥混凝土材料进行了较为系统的研究, 形成了适用于沥青路面分析研究的柔性路面设计理论和方法、刚性路面设计理论和方法、半刚性路面设计技术等。

我国现行规范, 沥青路面设计方法主要采用双圆垂直均布荷载作用下的多层弹性体系理论; 水泥混凝土路面设计方法主要采用单轴双轮组 100kN 标准轴载作用下的弹性半空间地基

有限大矩形薄板理论有限元解为理论基础。目前常用软件均是以这两种理论基础为依据，结合我国实际情况进行运用的。

随着大型土木工程和现代工业的发展，很多先进的材料、路面结构在道路工程中得到了应用。为了更加周全地考虑这些因素的影响，需要更加合理地分析，这就对设计研究人员提出了更为严峻的挑战，不仅要会使用相关软件，同时也要合理选择参数，建立模型。

(3) 本书主要内容。

本书从路面结构设计原理方面对我国现行《城镇道路路面设计规范》(CJJ 169—2012)、《公路水泥混凝土路面设计规范》(JTG D40—2011)进行解读，并利用 BISAR、EverStressFE 1.0、EverFE 2.25、URPDS、ABAQUS 等软件进行路面结构计算和对比分析，为相关技术人员对路面结构计算中参数、模型选择提供深层次认识。时温等效原理应用、科研数据分析处理是道路工程专业学习的重难点，本书结合 Origin 软件对上述内容进行实例应用，以提高道路工程专业人员时时温等效原理、科研数据分析的应用能力。

目前我国相关规范对路面结构设计流程、计算规则进行了详细介绍，相关单位也开发了路面结构计算相关软件。但规范以及相关软件对模型建立、参数选择并未做详细解读和介绍，仅仅按照提示要求输入相关参数即得出计算结果，可能会出现由于参数、模型选择不对出现错误的结论，最终影响我们的路面结构设计。而市面上缺少内容全面，条理清晰，讲解通俗易懂，将路面结构设计理论知识、软件应用相结合的著作。本书将路面结构设计理论与实践相结合，通过大量案例剖析，重点讲解不同路面结构计算时的软件选择、模型建立、参数选取，同时讲解了科研数据分析软件 Origin 在道路工程中的应用。

路面结构设计方法

路面结构是道路工程的一个重要分支,回顾历史,路面结构的研究和设计经历了一个漫长而又艰辛的探索和积累的过程。行驶在路面上的车辆,通过车轮把荷载传递给路面,再由路面传递给路基,在路基路面结构内部产生应力、应变及位移。早期的道路工程分析建立在观察和经验的基础上,经过长期的努力,已逐渐由经验为主的方法演变为结构分析理论为主的方法。

随着沥青路面和水泥路面的大量使用,研究学者对沥青材料 and 水泥混凝土材料进行了较为系统的研究,形成了适用于沥青路面分析研究的柔性路面设计理论和方法、刚性路面设计理论和方法、半刚性路面设计技术等。

1.1 路面结构设计方法简介

1.1.1 设计方法类型

由于设计思想和材料特性不同,柔性路面和刚性路面设计方法经历了不同的发展阶段,柔性路面设计先后经历了经验法、剪力指标法、弯沉指标法、基于回归分析的设计方法和力学经验法五个发展阶段;刚性路面中水泥混凝土路板应用最为广泛,关于水泥混凝土板,其应力指标一直是路面损坏的主要控制因素,因此刚性路面设计也始终以板内应力计算为核心,主要有解析法和数值法两种计算方法。

(1) 柔性路面

1) 经验法: Hogentogler (1929) 提出经验设计法 PR (Public Road), 将路基土分为均质土 A1~A8 和非均质土 B1~B3, 后由 HRB (Highway Research Board, 1945) 对土质分类进行了修订, Steele (1945) 据此提出了路面厚度的估算方法。1929 年,以加州承载比试验 CBR (California Bearing Ration) 为标准的设计法得到美国工程兵团的青睐,并在后来的二战中广为应用,在战后传播甚广。德国等欧洲国家也大多采用经验法,其设计指南提供了不同地质条件下的多种结构选择,经过两阶段综合评价后最终确定路面结构设计方案。经验法的缺点在于外延性受到限制,仅适用于给定的环境、材料和荷载条件,当这些参数发生变化时,需要重新进行试验和回归分析确定路面结构方案。

2) 剪力指标法: 以控制路基土的剪切损坏为标准。Barber (1946)、Mcleod (1953) 都提出过基于路面材料黏聚力 C 和内摩阻角 ϕ 的设计方法,力图控制路基顶面的剪切变形。但随着交通量和荷载水平的增长,路面逐渐变厚,这种损坏类型在路基上已经不再出现,因此在 20 世纪 60 年代后已经极少应用。

3) 弯沉指标法: 依据弯沉指标来确定路面的厚度,以保证载荷作用下路面弯沉不超过

容许弯沉值。1947年,德克萨斯州依据 Boussinesq 方程(1885)进行了变换,并限定路基容许弯沉值为 254 (0.01mm); 1953 年美国海军采用 Burmister (1943) 两层弹性体系理论,限定路表容许弯沉值为 635 (0.01mm)。这种方法的优点在于弯沉指标简单、直观、易测,但是弯沉与路面损坏并没有直接的关系,作为设计指标并不理想。

4) 基于回归分析的设计方法: AASHTO 设计法就是一个典型的例子,它基于试验路数据建立了大量的回归方程,并基于此提出了路面设计方法。这种设计方法的缺点在于它的回归方程仅适用于与试验路相同条件,当把这些方程外延应用于不同条件时,要进行大量的设计修正。此外,即便是条件相似,但由于实际工程的材料和施工都不能像试验路那样精确控制,往往与设计初衷存在很大偏差。

5) 力学经验法: 通常以材料对荷载的力学响应为指标,利用室内和野外数据来预测和评价路面损坏的可能性。Kerkhoven (1953) 首先提出采用路基顶面的压应变指标来控制路面的永久变形。Saal (1960) 建议采用沥青层底的水平拉应变来控制疲劳裂缝。

(2) 刚性路面

1) 解析解: 维斯特卡德 (Westergaard) 于 1926~1948 年间解算了温克勒 (Winkler) 地基上温度翘曲或荷载作用下板中、板角和板边的应力和弯沉,随后 Arlington 对试验路进行了验证。通过对比分析, Pickett 发现维斯特卡德的板角应力计算过于乐观,地基与板角完全接触的假设导致了计算应力远小于路面实际水平,应当充分考虑板角脱空的影响,因此他对原来的公式进行修正,提出了一个半经验公式,并随后被纳入了波特兰水泥协会 (PCA, 1951) 的设计方法。1966 年这个设计方法又将设计指标从板角应力改为接缝应力,后来这个方法进一步补充了冲刷模型、板边荷载模型和板边荷载疲劳模型 (PCA, 1984)。

温克勒地基也称为稠密液体地基,它假设地基和水泥板之间的接触应力只与该点的变形形成比例,而且孤立于其他相邻诸点,所以与实际路面状况存在很大差异。于是 Pickett (1951) 提出了弹性半无限体 (固体) 地基假设,通过一系列复杂的数学计算分析了水泥板内应力应变状况,但复杂的计算过程阻碍了这一方法的推广应用。

2) 数值算法: 工程实践中采用的混凝土路面板基本上都属于有限尺寸的矩形板,并非无限大。对于弹性半空间体地基上有限尺寸矩形板的板中、板边和板角作用车轮荷载时,求解相应位置的挠度和弯矩 (属非轴对称),在数学上有很大困难,至今尚未得出解析表达式。

有限元方法是结构和连续介质应力分析中一种较新而且有效的计算方法。利用有限元法研究学者可进行较为复杂工况和条件下的路面结构分析,目前常用的有限元软件有 ABAQUS、EverFE 2.25 等。

1.1.2 路面设计要素

1.1.2.1 交通分析

交通是路面设计的重要参数,而汽车又是路基路面的服务对象,车辆将荷载传递给面层,并通过基层扩散到路基,从而保证车辆快速、安全平稳地通过。因此路面设计时有必要对汽车荷载进行分析。

(1) 标准轴载

我国路面结构设计以双轮组单轴 100kN 为标准轴载,用 BZZ-100 表示。标准轴载计算参数应符合表 1-1-1 的规定。

表 1-1-1

标准轴载计算参数

标准轴载	BZZ-100
标准轴载 P (kN)	100
轮胎接地压强 p (MPa)	0.70
单轮传压面当量直径 d (cm)	21.30
两轮中心距 (cm)	$1.5d$

(2) 沥青路面轴载换算

1) 沥青路面以设计弯沉值、沥青层剪应力和沥青层层底拉应变为设计指标时, 各种轴载换算成标准轴载 P 的当量轴次 N_a 应按下式计算:

$$N_a = \sum_{i=1}^K C_1 C_2 n_i \left(\frac{P_i}{P} \right)^{4.35} \quad (1-1-1)$$

式中 N_a ——以设计弯沉值、沥青层剪应力和沥青层层底拉应变为设计指标时的当量轴次 (次/d);

n_i ——被换算车型的各级轴载作用次数 (次/d);

P ——标准轴载 (kN);

P_i ——被换算车型的各级轴载 (kN);

C_1 ——被换算车型的轴数系数;

C_2 ——被换算车型的轮组系数, 单轮组为 6.4, 双轮组为 1.0, 四轮组为 0.38;

K ——被换算车型的轴载级别。

当轴间距大于或等于 3m 时, 应按一个单独的轴载计算; 当轴间距小于 3m 时, 双轴或多轴的轴数系数应按下式计算:

$$C_1 = 1 + 1.2(m-1) \quad (1-1-2)$$

式中 m ——轴数。

2) 当沥青路面以半刚性基层层底拉应力为设计指标时, 各种轴载换算成标准轴载 P 的当量轴次 N_s 应按下式计算:

$$N_s = \sum_{i=1}^K C'_1 C'_2 n_i \left(\frac{P_i}{P} \right)^8 \quad (1-1-3)$$

式中 N_s ——以半刚性基层层底拉应力为设计指标时的当量轴次 (次/d);

C'_1 ——被换算车型的轴数系数;

C'_2 ——被换算车型的轮组系数, 单轮组为 18.5, 双轮组为 1.0, 四轮组为 0.09。

以拉应力为设计指标时, 双轴或多轴的轴数系数应按下式计算:

$$C'_1 = 1 + 2(m-1) \quad (1-1-4)$$

沥青路面设计基准期内一个车道上的累计当量轴次应按下式计算:

$$N_e = \frac{[(1+\gamma)^t - 1] \times 365}{\gamma} N_1 \eta \quad (1-1-5)$$

式中 N_e ——设计基准期内一个车道上的累计当量轴次 (次/车道);

t ——设计基准期 (年), 按表 1-1-2 选取;

N_1 ——路面营运一年单向日平均当量轴次（次/d）；
 γ ——设计基准期内交通量的年平均年增长率（%）；
 η ——设计车道分布系数，按表 1-1-3 选用。

表 1-1-2 路面设计基准期

道路等级	路面类型		
	沥青路面	水泥路面	砌块路面
快速路	15 年	30 年	—
主干路	15 年	30 年	—
次干路	15 年	20 年	10 年（20 年）
支路	10 年	20 年	

表 1-1-3 设计车道分布系数

车道特征	车道分布系数
单向单车道	1
单向两车道	0.65~0.95
单向三车道	0.5~0.8
单向四车道	0.4~0.7

(3) 水泥路面轴载换算

不同轴—轮型和轴载的作用次数换算为标准轴载的当量轴次应按下列公式计算：

$$N_c = \sum_{i=1}^n \delta_i N_i \left(\frac{P_i'}{100} \right)^{16} \tag{1-1-6}$$

$$\delta_i = 2.22 \times 10^3 P_i'^{-0.43} \tag{1-1-7}$$

或
$$\delta_i = 1.07 \times 10^{-5} P_i'^{-0.22} \tag{1-1-8}$$

或
$$\delta_i = 2.24 \times 10^{-8} P_i'^{-0.22} \tag{1-1-9}$$

式中 N_c ——标准轴载的当量轴次；
 P_i' ——单轴—单轮、单轴—双轮组或三轴—双轮组轴型 i 级轴载的总重（kN）；
 n ——轴型和轴载级位数；
 N_i ——各类轴型 i 级轴载的作用次数；
 δ_i ——轴—轮型系数，单轴—双轮组时， $\delta_i=1$ ；单轴—单轮时，按式（1-1-7）计算；
双轴—双轮组时，按式（1-1-8）计算；三轴—双轮组时，按式（1-1-9）计算。

设计基准期内水泥混凝土面层临界荷位所承受的累计当量轴次应按下式计算：

$$N'_c = \frac{N'_1 \times [(1 + \gamma)^t - 1] \times 365}{\gamma} \eta_s \tag{1-1-10}$$

式中 N'_c ——水泥混凝土路面设计基准期内临界荷位所承受的累计当量轴次（次）；
 N'_1 ——水泥混凝土路面设计车道使用初期的当量轴载日作用次数（次/d）；
 η_s ——水泥混凝土路面临界荷位处的车辆轮迹横向分布系数，按表 1-1-4 选用。

表 1-1-4 车辆轮迹横向分布系数

道 路 等 级		纵缝边缘处
快速路、主干路		0.17~0.22
次干路及以下道路	车行道宽>7m	0.34~0.39
	车行道宽≤7m	0.54~0.62

注 行车道较宽或交通量较大时，取高值；反之，取低值。

(4) 交通等级划分

交通等级可根据累计轴次按表 1-1-5 规定划分为 4 个等级。

表 1-1-5 交 通 等 级

交通等级	沥 青 路 面	水 泥 路 面
	累计当量轴次 N_e (万次/车道)	累计当量轴次 N'_e (万次)
轻	<400	<3
中	400~1200	3~100
重	1200~2500	100~2000
特重	>2500	>2000

交通年平均增长率应在项目可行性研究报告等资料基础上，经研究调查分析与类似道路比较后确定，一般取值 4%~6%。也可分不同时段进行平均增长率的评定。

1.1.2.2 环境分析

路面结构直接承受着行车荷载，同时受到雨水、温度、湿度等自然因素的耦合作用，对路面产生一定的影响。因此，在路面结构设计、施工及后期管理养护中都应十分重视环境因素的影响。

(1) 湿度变化对路面结构的影响

路基干湿状态对路面结构强度、刚度和稳定性有直接影响。在道路运营过程中，地区自然环境、季节、气温、降雨量、蒸发状态以及道路排水设计等直接影响到路基干湿状态。

路基土在最佳含水量下压实可达到最大密实度，达到较高的力学强度。当含水量过高时，路基土趋于潮湿或过湿状态，路基上部土层处于地下水或地表积水毛细影响，其力学强度将大大降低；当含水量过低，土颗粒之间由于缺少黏结作用，颗粒松散，压实较为困难。

沥青面层在受到降雨影响时，可能会出现由于沥青混合料水稳定性不足而引发水损坏，已有研究表明，诱发水损坏的外因是降水和车辆荷载，内因是路面材料的水稳定性不足，最终路面表现为翻浆、坑洞和内部松散，如图 1-1-1 所示。

水对水泥混凝土面层影响不大，但是对其下土基、垫层、基层影响较为明显。水泥混凝土路面接缝和裂缝处容易出现啃边现象，导致填缝失效，如图 1-1-2 所示。降雨顺着接缝和裂缝进入基层，车辆行驶过程中产生动水压力，最终引起基层细集料的剥落和迁移，最终路面表现为翻浆，如图 1-1-3 所示。

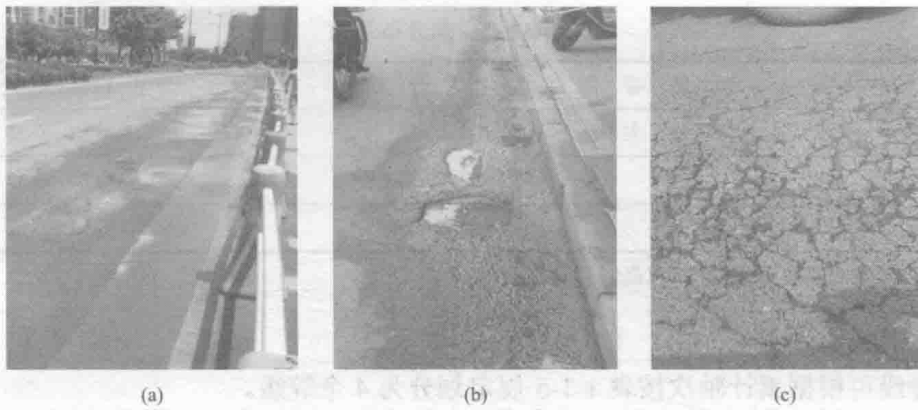


图 1-1-1 沥青路面水损害
(a) 翻浆; (b) 坑洞; (c) 内部松散



图 1-1-2 接缝料失效



图 1-1-3 翻浆

(2) 温度变化对路面结构的影响

大气温度在一天内及四季内发生着周期性的变化,受大气直接影响路面结构内部温度也发生着周期性变化。图 1-1-4 分别显示了夏季晴天高温气温昼夜变化观测结果,图 1-1-5 显示了对应气温下沥青面层 6cm 深度处温度变化规律,可见路面结构内温度变化与气温呈现相同的变化规律。

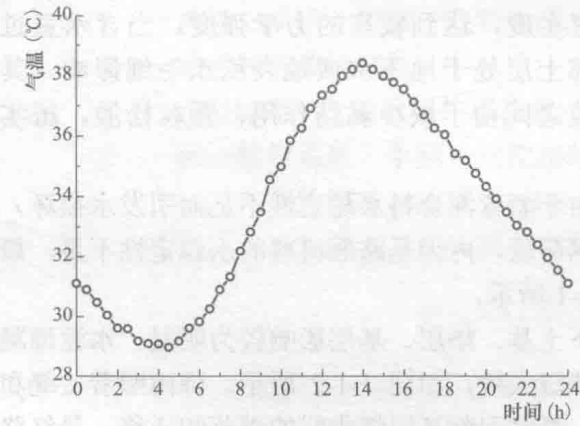


图 1-1-4 日气温比变化曲线

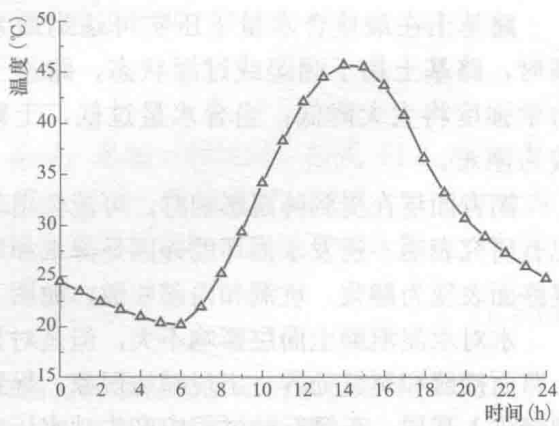


图 1-1-5 沥青面层 6cm 处温度变化曲线

因此在沥青混凝土路面结构设计中应考虑温度变化对面层的影响。

(3) 路面设计环境要素规定

1) 水泥混凝土面层的最大温度梯度标准值 (T_g)，根据道路所在地的道路自然区划，按表 1-1-6 确定。

道路自然区划	II、V	III	IV、VI	VII
最大温度梯度 (°C/m)	83~88	90~95	86~92	93~98

注 海拔高时，取高值；湿度大时取低值。

我国公路自然区划分为三个层次，即一级区划、二级区划和三级区划。一级区划以两条均温等值线（全年均温-2℃等值线和一月份均温 0℃等值线）和两条等高线（1000m 和 3000m）作为分界线，将全国分为 7 个一级自然区。其中，I 区为北部多年冻土区；II 区为东部湿润季节区；III 区为黄土高原干湿过渡区；IV 区为东南湿热区；V 区为西南潮暖区；VI 区为西北干旱区；VII 区为青藏高寒区。

二级区划是在每一个区区内，在以潮湿系数为依据，分为 6 个等级。潮湿系数 K 为年降雨量 R 与年蒸发量 Z 之比，见表 1-1-7，即

$$K=R/Z$$

(1-1-11)

潮湿系数	过湿	中湿	湿润	润干	中干	过干
K	>2	2~1.5	1.5~1	1~0.5	0.5~0.25	<0.25

三级区划是二级区划的进一步细分，由各地根据当地的地貌、水文和土质类型等具体情况进行划分。

2) 湿度

地下水位应至少保持在路表下 1m 以外，而季节性冰冻区的地下水文应采用更加严格的标准，至少保持在路表下 1.5~2m 以外，以避免路基过湿而出现承载力不足或冻胀病害。虽然我国按照路床表面下 80cm 深度内土的平均稠度将路基湿度状况分为干燥、中湿、潮湿和过湿四种状态，但是由于路线长度覆盖区域范围广泛，地下水分布变化大等原因，路基的湿度实际上很难准确估计，设计时应尽量采用保守考虑。

3) 气候分区

“八五”国家科技攻关项目“道路沥青及沥青混合料使用性能气候区划的研究”，根据我国不同地区与不同气候条件对沥青质量及沥青混合料性质提出不同的要求，提出沥青混合料使用性能气候区划分标准。按不同的气候要求，使路面具有较强的高温抗车辙能力、低温抗裂性能和水稳定性，并延长路面的使用寿命，是路面设计的重要问题。路面设计应选择与温度变化相适应的材料并按照最高或最低温度进行沥青混合料高温稳定性和低温稳定性设计。

我国现行《城镇道路路面设计规范》(CJJ 169)对沥青面层使用性能气候分区进行详细规定，主要分为三种区划分类。

①设计高温分区