

路面结构理论与材料

张海涛 程培峰 ©编著



科学出版社

014056795

U416
16

路面结构理论与材料

张海涛 程培峰 编著



科学出版社

北京



北航

C1741806

U416

16

内 容 简 介

本书是道路设计理论与方法的专业书籍, 主要介绍世界道路结构设计理论及材料特性。全书共分为两个部分。第一部分主要介绍世界路面设计理论与方法。例如, 经验法中的 CBR 设计法、AASH(T)O 设计法等, 力学经验法(理论法)中的 Shell 设计法, 弹性层状体系及理论方法等。第二部分主要介绍道路材料特性, 即沥青混合料与水泥混凝土特性与组成设计。在全面介绍路面结构设计理论与材料性能的基础上, 着重强调中国采用的相应设计理论与方法。

本书为交通运输工程研究生必修学位课程教材、土木工程及相关学科研究生选修教材。也可供公路、城市道路、铁道、机场等部门从事科研与设计的工作人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

路面结构理论与材料 / 张海涛, 程培峰编著. —北京: 科学出版社, 2014. 6

ISBN 978-7-03-041122-8

I. ①路… II. ①张…②程… III. ①路面-工程结构②路面-工程材料 IV. ①U416

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 129147 号

责任编辑: 谷 宾 杨向萍 / 责任校对: 桂伟利

责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

骏杰印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 6 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2014 年 6 月第一次印刷 印张: 31

字数: 613 000

定价: 128.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

本书是交通运输工程一级学科及其他相关学科的研究生专业课教材，涉及的相关课程有路面结构设计理论、沥青与沥青混合料及水泥混凝土材料等。作者凭借多年的研究生专业课教学经验，对教学内容及方法等进行了一些有意义的探索，强调知识面的广度与深度，不过多讲授一些常规的基本概念，注重问题的讨论与研究环节而不是简单地介绍。本书各部分内容侧重结合前沿信息介绍最新的研究概况，形成了一套比较科学合理的研究生专业课教学体系。研究生的专业课知识涉及面较广，需要不同类型的参考书，因此，教材编写参考了多方面信息，将路面结构理论与路面材料等多个方面的内容集中在一起，形成了具有综合性的专业课教材。

本书共分为 19 章，包括两部分内容。第一部分路面结构设计理论与方法，共 14 章内容；第二部分路面结构材料，共 5 章内容。第 1 章综述路面结构理论，第 2 章介绍路面结构强度的影响因素，第 3、4、5、6、7、8、9、10、11、12、13、14 章介绍世界路面结构设计理论与方法，第 15、16、17 章介绍沥青与沥青混合料性能与设计，第 18 章介绍水泥混凝土材料性能与设计，第 19 章介绍路面结构理论与材料研究概况。

限于作者水平，书中疏漏在所难免，敬请广大读者批评指正。

目 录

第一部分 路面结构设计理论与方法

第 1 章 路面结构理论综述	3
1.1 道路的发展概况	3
1.2 路面结构	4
1.3 路面设计理论与方法	6
1.4 机场道面	9
第 2 章 路面结构强度的影响因素	11
2.1 车辆荷载	11
2.2 环境因素	20
2.3 材料特性	31
2.4 路面结构破坏状态与设计标准	56
第 3 章 路面古典设计理论与方法	67
3.1 麻省公式设计法	67
3.2 Downs 公式设计法	67
3.3 Gray 公式设计法	68
3.4 水泥混凝土路面古典设计理论与方法	69
3.5 小结	70
第 4 章 CBR 设计理论与方法	72
4.1 CBR 试验简介	72
4.2 CBR 设计曲线	73
4.3 CBR 设计法的计算公式	76
4.4 CBR 设计新法	80
4.5 机场沥青道面 CBR 设计法	81
4.6 小结	85
第 5 章 AASHTO 沥青路面设计理论与方法	88
5.1 AASHO 试验路	88
5.2 耐久性指数与路面设计标准	89
5.3 AASHO 试验路基本方程	93

5.4	AASHO 设计法	96
5.5	1986 年版 AASHTO 设计法	99
5.6	2002 年版 AASHTO 设计法	101
5.7	小结	116
第 6 章	AASHTO 水泥混凝土路面设计理论与方法	120
6.1	简介	120
6.2	设计使用年限与车辆换算	123
6.3	板厚计算	124
6.4	水泥混凝土罩面层厚度设计	125
6.5	小结	126
第 7 章	AI 设计理论与方法	127
7.1	简介	127
7.2	设计标准	129
7.3	设计当量轴载 ESAL	130
7.4	材料参数	134
7.5	设计方法	142
7.6	机场沥青道面 AI 设计法	153
第 8 章	SHELL 设计理论与方法	160
8.1	1963 年版 SHELL 设计法	160
8.2	1967 年版 SHELL 设计法	162
8.3	1978 年版 SHELL 设计法	163
8.4	1985 年版 SHELL 设计法	174
第 9 章	弹性层状体系设计理论与方法	192
9.1	简介	192
9.2	中国弹性层状体系设计理论与方法	192
第 10 章	FAA 机场沥青道面设计理论与方法	199
10.1	飞机荷载	199
10.2	沥青道面厚度与设计曲线	200
10.3	基层与垫层	200
10.4	稳定类基层和垫层	202
10.5	冰冻影响	203
10.6	设计算例	204
第 11 章	FAA 机场水泥混凝土道面设计理论与方法	206
11.1	简介	206

11.2	计算参数	206
第 12 章	USACE 设计理论与方法	209
12.1	设计参数	209
12.2	冰冻作用	212
12.3	设计图表	213
第 13 章	PCA 设计理论与方法	214
13.1	水泥混凝土路面 PCA 设计理论与方法	214
13.2	机场水泥混凝土道面 PCA 设计理论与方法	219
第 14 章	弹性地基板体系设计理论与方法	222
14.1	中国水泥混凝土路面设计理论与方法	222
14.2	中国机场水泥混凝土道面设计方法	236
14.3	特种水泥混凝土路面设计方法	242
14.4	旧水泥混凝土路面加铺层设计	250

第二部分 路面结构材料

第 15 章	沥青	269
15.1	概述	269
15.2	沥青种类	271
15.3	沥青的技术特性	301
15.4	沥青的力学特性	305
15.5	沥青的黏弹特性	314
15.6	沥青的基本试验	322
15.7	沥青技术指标体系	323
第 16 章	沥青混合料力学特性	339
16.1	沥青混合料的结构组成与强度原理	339
16.2	沥青混合料的疲劳特性	344
16.3	沥青混合料的黏弹特性	349
16.4	沥青混合料的强度稳定性	352
第 17 章	沥青混合料组成设计	362
17.1	概述	362
17.2	沥青胶结料的选用	363
17.3	集料的结构设计	373
17.4	沥青混合料配合比设计	386
第 18 章	水泥混凝土材料	425

18.1	普通水泥混凝土配合比设计	425
18.2	钢纤维水泥混凝土配合比设计	432
18.3	碾压水泥混凝土配合比设计	436
18.4	贫水泥混凝土配合比设计	440
18.5	特种水泥混凝土简介	443
第 19 章	路面结构理论与材料研究概况	445
19.1	动载（移动荷载）弹性层状体系理论	445
19.2	沥青路面结构可靠度设计方法	453
19.3	水泥混凝土路面设计极限状态方程的修正	460
19.4	沥青与沥青混合料新技术	465
19.5	美国战略公路研究计划	476
参考文献		485



第一部分 路面结构 设计理论与方法



第 1 章 路面结构理论综述

1.1 道路的发展概况

中国的道路运输有着悠久的历史，传说中的禹贡九州时期就有了道路的概念；周代已经有了道路系统与城市道路规划，王朝与诸侯之间都有大道相通，而且很重视道路工程建设、道路养护和环境保护；秦朝统一政权后兴路政；汉代则继续扩大了修筑道路的范围，并向边陲地区发展；三国时期“明修栈道，暗度陈仓”的故事脍炙人口；隋代修筑车行大道也颇为可观；唐代道路交通里程超过 5 万里；宋代在水运方面及陆路交通也都有较大发展；元代在陆路交通方面发展极快；明代的道路交通基本是在元代基础上进行扩展充实的；清代兴盛时，道路交通里程达到 10 万里；“中华民国”时期公路有了初步发展，全国先后共修建了 13 万公里，这些公路大多标准很低、设施简陋、路况很差，到 1949 年能够维持通车的仅有 8 万公里，全国有 1/3 的县不通公路，西藏地区没有一条公路。1949 年新中国成立以来，中国公路交通事业得到了迅速的发展，特别是 1978 年以后，国家执行了以经济建设为中心的政策，公路建设也开创了崭新的局面。到 2012 年底，全国公路通车里程已超过 400 万公里，其中，高速公路总里程超过 9 万公里。2013 年交通运输部又颁布了新的国家公路网规划，新的国家公路网建设规模将从原来的不到 20 万公里提高到 40 万公里（包括普通国道和国家高速公路），公路运输在国民经济中占有越来越重要的地位。

自 20 世纪 80 年代中期以来，中国大陆开始建设高速公路，陆续投入运行的主要高速公路有沪嘉、沈大、京津塘、京石、合宁、济青、开洛、广深、太旧、合芜、成渝、沪宁、桂柳、呼包、哈大、泉夏、石安、安新等多条线路。高速公路的建设和使用，为汽车快速、高效、安全、舒适地运行提供了良好的条件，标志着中国的公路运输事业和科学技术水平进入了一个崭新的时代。

路面直接承受行驶车辆的作用，是道路工程的重要组成部分，通常都根据车辆行驶的需要，选用优质材料建成。进入 20 世纪后，随着汽车工业和交通运输的发展，现代化公路的路面工程逐步形成了新的学科分支，它主要研究公路、城市道路和机场跑道路面的合理结构、设计原理、设计方法、材料性能要求以及施工、养护、维修和管理技术等。

半个世纪以来，广大道路工程科技工作者，经过刻苦钻研、反复实践，在路

面工程建设和科学研究中,取得了许多突破性的系列成果。主要包括:

- (1) 公路自然区划、温度区划与降雨区划(20 世纪 60 ~ 70 年代);
- (2) 沥青路面气候分区(21 世纪 10 年代);
- (3) 土的工程分类及路基强度与稳定性(20 世纪 60 ~ 70 年代);
- (4) 高路堤修筑技术与软土地基稳定技术(20 世纪 60 ~ 70 年代);
- (5) 岩石路基爆破技术(20 世纪 60 ~ 70 年代);
- (6) 沥青路面结构(20 世纪 60 年代);
- (7) 水泥混凝土路面结构(20 世纪 70 年代);
- (8) 柔性路面设计理论与方法(20 世纪 70 年代);
- (9) 刚性路面设计理论与方法(20 世纪 70 年代);
- (10) 半刚性路面结构(20 世纪 80 年代);
- (11) 路面使用性能与表面特性(20 世纪 80 年代);
- (12) 路面养护管理(20 世纪 80 年代)。

综上所述,路面工程作为一个学科分支,在中国,随着交通运输的发展,正在以较快的速度逐步接近国外同类学科的前沿。进入 21 世纪,交通运输不论是在中国,还是在其他发达国家,仍然是一个重要的科技领域,中国道路科技工作者从中国的实际出发,不断吸取交叉学科的新成就以及世界各国的有用经验,全面推动路面工程学科的发展。

1.2 路面结构

1.2.1 公路分级

公路根据使用任务、功能和适用的交通量分为高速公路、一级公路、二级公路、三级公路、四级公路 5 个等级。高速公路为专供汽车分向、分车道行驶并全部控制出入的干线公路,其他公路为除高速公路以外的干线公路、集散公路、地方公路,分 4 个等级^[1]。

1.2.2 路面分级与分类

1. 按面层使用品质

通常按路面面层的使用品质、材料组成类型以及结构强度和稳定性,将路面分为高级路面、次高级路面、中级路面、低级路面 4 个等级。

2. 按路面结构力学特性

按路面结构的力学特性和设计方法的相似性,将路面划分为柔性路面、刚性路面和半刚性路面3类。

1.2.3 路面结构层

路面结构一般分为面层、基层、垫层。

面层是直接同行车和大气接触的表面层,可以分两层或三层铺筑,它承受较大的行车荷载的垂直力、水平力和冲击力,同时还受到降水的侵蚀和气温变化的影响。因此,同其他层次相比,面层应具有较高的结构强度,抗变形能力,较好的水稳定性和温度稳定性,而且应当耐磨不透水,其表面还应有良好的抗滑性和平整度。修筑面层所用的材料主要有:水泥混凝土、沥青混凝土、沥青碎(砾)石混合料、砂砾、碎石掺土或不掺土的混合料以及块料等。

基层主要承受由面层传来的车辆荷载的垂直力,并扩散到下面的垫层和土基中去。基层可以分为两层或三层铺筑。实际上,基层是路面结构中的承重层,它应具有足够的强度和刚度,并具有良好的扩散应力的能力。基层遭受大气因素的影响虽然比面层小,但是仍然有可能经受地下水和通过面层渗入雨水的浸湿,所以基层结构应具有足够的水稳定性。基层表面虽不直接供车辆行驶,但仍然要求有较好的平整度,这是保证面层平整性的基本条件。修筑基层的材料主要有各种结合料(如石灰、水泥或沥青等)稳定土或稳定碎(砾)石、贫水泥混凝土、天然砂砾、各种碎石或砾石、片石、块石或圆石,各种工业废渣(如煤渣、粉煤灰、矿渣,石灰渣等)和土、砂、石所组成的混合料等。

垫层介于土基与基层之间,它的功能一方面是改善土基的湿度和温度状况,以保证面层和基层的强度、刚度和稳定性不受土基水温状况变化所造成的不良影响;另一方面的功能是将基层传下的车辆荷载应力加以扩散,以减小土基产生的应力和变形。同时也能阻止路基土进入基层中,影响基层结构的性能。修筑垫层的材料,强度要求不一定高,但水稳定性和隔温性能要好。常用的垫层材料分为两类,一类是用松散粒料(砂、砾石、炉渣等)修筑的透水性垫层;另一类是用水泥或石灰稳定土等修筑的稳定类垫层。

1.2.4 路面结构功能与使用品质

路面的功能不仅能够保证汽车在道路上能够全天候行驶,而且能保证汽车以一定的速度安全、经济、舒适地行驶。为了保证道路最大限度地满足车辆运行的要求,提高车速、增强安全性和舒适性,降低运输成本和延长道路使用年限,要

求路面具有下述一系列基本性能：①强度和刚度；②稳定性；③耐久性；④表面平整度；⑤表面抗滑性能。

1.3 路面设计理论与方法^[2]

路面设计理论与方法的研究发展过程如表 1-1 所示。

表 1-1 路面设计理论与方法的研究发展过程

	20 世纪 10 年代	20 世纪 30 ~ 40 年代	20 世纪 50 ~ 60 年代	20 世纪 70 ~ 90 年代	21 世纪 10 年代
美国	古典理论	CBR Marshall	AASH(T)O	SHRP1 (Superpave, FWD, PPM)	SHRP2
中国	—	国外理论	—	弹性层状体系理论, 公路自然区划, 半刚性基层, 高速公路开始建设	高速公路 >9 万 km

路面设计理论与方法的分类如图 1-1 所示。

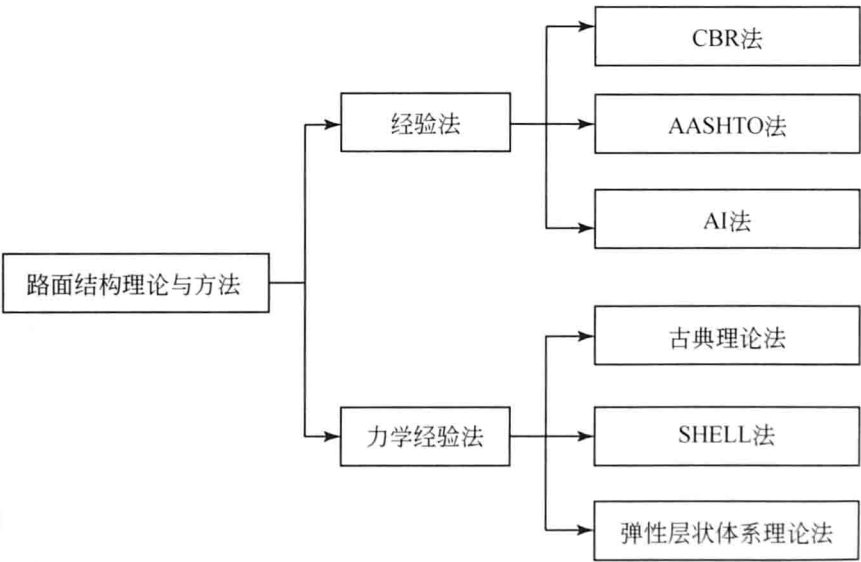


图 1-1 路面设计理论与方法的分类

1.3.1 沥青路面设计理论与方法

通常把以沥青磨耗层及一定厚度的沥青混合料面层为主的沥青路面称之为沥青路面。相对于水泥混凝土路面而言，沥青路面结构层材料的弹性模量及强度较低。在车辆荷载作用下，沥青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。20世纪40年代,重型货车大量出现在公路上,薄型结构已无法承受交通量的增长,沥青路面开始采用较厚的结构组合和强度较高的材料,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70~80cm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。自世界发达国家大规模兴建高速公路以来,对路面的使用品质要求更高了,要求沥青路面具有良好的平整性和抗滑及耐磨性,以保证车辆高速行驶平稳、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^[2]。

沥青路面设计理论与方法的发展是随着交通的发展与路面结构、材料不断地更新而同步发展的。沥青路面结构开始建造的主要目的是为保护路基土,使之不承受车辆的直接作用,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。这一点反映在设计理论与方法上,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Downs修正公式、1934年的Gray公式、1940年的Goldbeck公式等,都是运用古典土力学公式验算。

沥青路面经验设计法是在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的情况下提出的,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)、加拿大马克里奥设计法(1946)、美国陆军工程兵团的CBR设计法(1945)、美国AASHTO设计法(1961),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沥青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沥青路面设计方法进入一个新的阶段。

沥青路面理论设计法(力学经验设计法)是以Burmister 1943年发表的弹性双层体系理论解析解开始的。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理论方法,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Burmister 1943年的论著发表之后,于1945年又提出了三层弹性体系理论,1948年Fox和Hank给出了数值解,1951年Acrum和Fox等及1962年Jones和Peattie发表了三层体系实用图表,中国道路工作者自20世纪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,取得了丰富的研究成果。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。现在一些国家和地区建立了以层状体系理论为基础的沥青路面结构设计方法,其中,较为完善的有英荷壳牌石油公司(Shell)、美国地沥青学会(AI)、中国、前苏联、比利时等国的方法,还有许多国家采用了此方法或者正在研究阶段,沥青路面理论设计法已成为沥青路面结构设计方法的发展趋势。

中国沥青路面设计方法自新中国成立以来开展了长期系统的研究,共提出过1958年、1966年、1978年、1987年、1997年五个版本,目前研究工作仍在继续深入开展之中。中国沥青路面设计方法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;1997年颁布的沥青路面设计规范,又有了进一步的改善,主要特点是以多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,以轮隙弯沉及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。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进行深入研究,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及规范中。

1.3.2 水泥混凝土路面设计理论与方法

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,在车辆荷载作用下变形很小。因此,从力学观点出发,把水泥混凝土路面称之为刚性路面。混凝土路面板的弹性模量及力学强度远远大于基层或土基的弹性模量及力学强度,此外,水泥混凝土材料的抗弯拉强度远小于其抗压强度。因此,在车辆荷载作用下,路面板产生破坏的主要形式为局部位置疲劳弯拉应力超过容许疲劳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,Older和Goldbeck根据材料力学原理,提出了最早的水泥混凝土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世纪20~60年代,水泥混凝土路面应力计算及厚度设计方法方面的研究日趋完善,1926年Westergaard、1938年Hogg、1943年Burmister、1953年Koran等在水泥混凝土路面荷载应力及厚度设计方法的研究成果是水泥混凝土路面设计方法的基础。20世纪60年代中期,有限元法的应用使水泥混凝土

路面应力分析与设计计算有了新的发展,张佑启和 Zienkiewicz 提出了弹性地基板的有限元分析法, Hudson 和 Matlock 用离散单元法分析了 Winkler 地基上水泥混凝土路面板存在脱空情况下的应力。20 世纪 70 年代初 Sargiou 和张佑启、黄仰贤和王先俊系统探讨了弹性地基水泥混凝土路面的有限元分析法。20 世纪 80 年代初黄仰贤与邓学钧合作完成了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等。中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,成为现行水泥混凝土路面设计规范的基础。近年来,水泥混凝土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水泥混凝土路面应力状态等,这些研究工作将推动水泥混凝土路面应力分析与设计计算方法进入一个新的阶段。

1.4 机场道面

机场道面设计的主要任务是提供适合当地自然环境条件、满足飞行使用要求的道面结构,同路面结构设计有相近点,但也有许多不同点。组成道面结构层的材料是由不同来源和性质的材料按不同的方式和配比组合而成的各种混合料,这些混合料的力学性质受料源和施工状况的影响而变异性很大。同时,道面结构物所处的环境又复杂多变,而道面材料的物理力学性质和道面结构体系的承载力对环境的变化十分敏感,这就更加剧了材料和结构性能的变异性。此外,作用在道面上的飞机荷载,无论是大小、数量、分布频率和计算图式,都是可变的随机荷载,这又使道面结构的可靠性受到影响。

道面结构的损坏状态包括结构性破坏和功能性破坏,结构性破坏是指整个道面结构或其中某些组成部分不能再承受荷载作用的破坏,如断裂等。这是一般结构物设计通常采用的临界状态。功能性破坏是指道面结构在使用过程中,在荷载和自然因素多次循环重复作用而出现的使用品质的逐渐破坏,包括不平整或太光滑等,道面设计的基本任务是尽可能减少这两种破坏的发生。

机场道面使用性能的变化与飞机飞行速率、起飞和着落架次(交通量)、道面结构强度密切相关。对于同样水平的交通量而言,结构强度越高、道面破坏速率越慢,使用年限越长,反之,道面破坏速率越快。因此,道面设计与使用年限密切相关。此外,道面破坏速率的加快与养护措施、道路施工质量有关。因此,