

路面设计

Lumian Sheji

〔苏〕 И.А.卡罗日斯基

H.A.梅特万特柯娃

B.H.勒杨浦辛 等编

吴佩瑜 杨家琪 译

人 民 交 通 出 版 社

内 容 提 要

本书研究了路面设计、对基层的要求、各种土壤-地质条件的路面结构等问题,介绍了土和结构层材料的计算特性以及按极限状态计算路面的方法和示例。

本书可供公路和城市道路专业的技术人员、院校师生及设计和科研工作者参考。

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД

Я.А.КАЛУЖСКИЙ

Н.А.МЕДВЕДКОВА

В.Н.РЯПУХИН

Главное издательство издательского объединения

«Выща школа» 1981

路 面 设 计

〔苏〕 Я.А.卡罗日斯基

Н.А.梅特万特柯娃 等编

В.Н.勒杨浦辛

吴佩瑜 杨家琪 译

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: 3.75 字数: 77 千

1987年9月 第1版

1987年9月 第1版 第1次印刷

印数: 0001—10,650册 定价: 0.80元

目 录

前言	1
1. 路面结构及其运输使用质量	2
1.1 路面的功用及对它的基本要求	2
1.2 运输工具和自然因素对路面的作用	4
1.3 路面状态对汽车运输使用指标的影响	6
1.4 结构层, 路面分类	9
2. 路面基础设计	13
2.1 活载作用下的路面土基状况	13
2.2 路基的水-温状态和土基强度的季节性 变化	19
2.3 材料和路基土的计算特性	22
2.4 复杂条件下的路面基础结构设计	31
3. 柔性路面设计	36
3.1 计算方法	36
3.2 柔性路面强度理论	40
3.3 确定路面允许弯沉	45
3.4 路面设计时考虑交通组成和密度的影响	46
3.5 确定路面的要求弹性模量	51
3.6 按允许弹性弯沉计算路面厚度	54
3.7 按土基和低粘性材料层中的剪切计算 路面厚度	57
3.8 按弯拉应力计算整体性材料层	66

3.9	过渡式路面的计算	70
3.10	柔性路面设计的特殊情况	71
3.11	路面结构设计的基本原则	77
3.12	柔性路面计算示例	79
4.	刚性路面设计	83
4.1	刚性路面的主要结构	83
4.2	计算的理论基础	85
4.3	刚性路面基层的设计	87
4.4	混凝土和钢筋混凝土板的厚度计算	90
4.5	按温度应力的板长计算	94
4.6	装配式和预应力钢筋混凝土面层的 计算特性	96
4.7	板的连接结构	99
4.8	刚性路面计算示例	103
5.	路面水温状态设计	107
5.1	防冻层厚度计算	107
5.2	路面排水层设计	110

参考文献

前 言

《苏联1981~1985年及1990年以前的经济和社会发展基本方针》规定：“提高道路的施工、养护质量、特别要重视交通安全”^①。这些问题的解决直接与路面可靠的计算及最佳的结构设计有关。

我们按《道路设计》课程大纲编写了本教科书。它的主要任务是指导未来的工程师正确地评价和设计路面，因为汽车运输工作的技术经济指标取决于路面的状态和质量。书中系统地叙述了刚性路面和柔性路面计算理论的发展历史（从最简单的图式到现代国内外采用的方法），特别注意了不同自然-气候条件下这些路面结构设计方面的新成果和处理方法，论述了土和结构层材料的计算特性，列出了按极限状态计算路面的方法和实例。本书仅概括地研究了水温状态调节问题，因为在专门的文献中对此已有详细的说明。

技术科学博士、莫斯科公路学院教授 A.Я.都拉也夫和以技术科学副博士、讲师 B.И.阿斯泰弗也夫为首的里沃夫综合技术学院道路教研组全体成员，对本书作了书评。同时哈尔科夫公路学院道路设计教研组的工作人员 П.М.哈里托那夫、Т.И.苏米金和 С.Н.聂奇立科也对定稿和准备出版等工作给予了大力帮助，作者谨向他们致以深切的谢意。

① 苏联1981~1985年及1990年以前的经济和社会发展基本方针——M.政治出版社，1981，56页。

1. 路面结构及其运输使用质量

1.1 路面的功用及对它的基本要求

用不同的材料在路基上铺筑的一层或多层的行车道加固结构称为路面（图 1），其目的是要构成一个供汽车行驶的坚固而平整的表面。

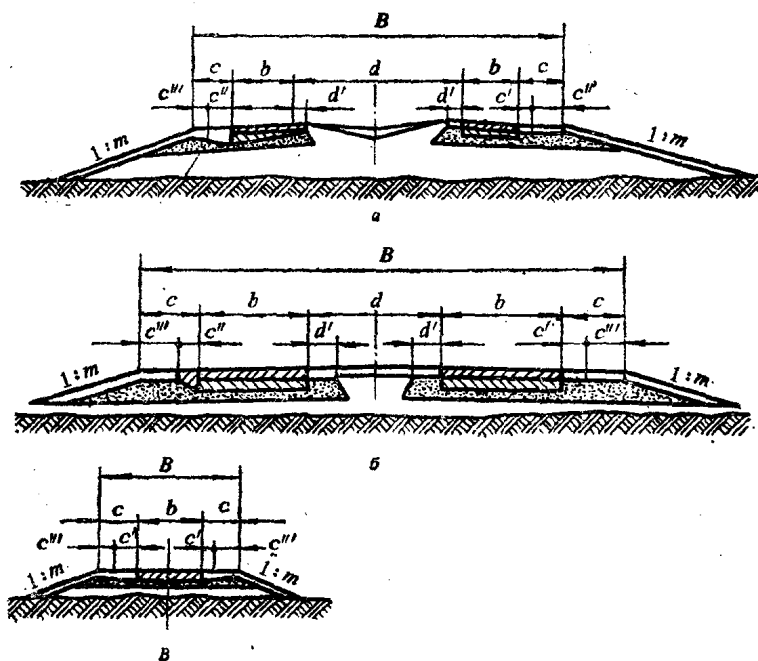


图 1 路基上行车道布置图
a、b—I 级路；B—II~IV 级路

象任何工程建筑物一样，路面应具有足够的可靠性和经济性，并符合一定的使用要求。路面的可靠性是指它在规定的或给定的使用期内，保证计算车辆以接近于最佳的平均车速安全运行的能力。可靠性取决于路面的弹性模量、结构层材料的强度、水稳性、抗冻性、耐磨性以及土的类型、路基的水温状态和弹性模量。

在路面结构设计时应特别重视地方材料：结合料和改善结合料性质或部分代替结合料的外加剂（矿渣——特别是粒状灰渣和烟灰，某些树脂以及用来作为乳化剂的废料等等）。广泛利用沿线采石场中的碎石、砾石、岩屑、砂以及事先经过处理的各种土来铺筑路面。除地方材料外还采用这样一些外运材料，如沥青、水泥、高强度的碎石。用这些材料就地制备沥青混凝土和水泥混凝土、陶粒碎石等等。

为了合理地进行路面结构设计，按不同条件将整条公路划分成若干段，使每一路段内有相同的计算荷载，交通组成和交通量，同一种土质条件、水温状况以及相同的建筑材料供应条件。

除可靠性和经济性外，对路面还应提出许多使用要求：

1) 有足够的强度。此强度不受使用过程中潮湿状态变化的影响（特别是繁重交通道路的高级路面）；

2) 有一定的表面平整度，保证汽车高速行驶没有冲击和摆动；

3) 有较高的面层粗糙度。它应保证车轮和面层的附着系数不低于规定值，也就是保证高速安全运行；

4) 没有面层磨耗作用的副产品。这种产物会使行车条件恶化，并对道路使用者的健康有害。

对I、II和III级道路提出较高的要求；对IV和V级道路

则允许在春天和秋天路面强度有某些降低，在干旱季节有灰尘。具体方案应根据技术经济条件采用。

1.2 运输工具和自然因素 对路面的作用

路面在运输工具和气候因素作用的复杂条件下工作。在路上运行的运输工具构成路面的主要荷载。车辆的车轮直接和面层相互作用，传递垂直力和水平力到面层上。由于面层表面的不平整引起车轮冲击和汽车振动，所以动荷载实际上总是比静荷载要大。

A.K.毕鲁利亚，H.Я.高华罗兴柯，A.A.西拉也夫等人所进行的理论和试验研究表明：车速小于 80km/h （相当于 22.2m/s ）时，在平整的面层上，车轮最大压力的增加与速度成正比，而在更高车速时，压力实际上保持不变。

施加在面层表面的水平力的特点是，作用在该受荷面积上的时间短，而且仅使路面上层处于受力状态；垂直力则使更深的层次处于受力状态。

平整的面层，在结构层和路面下垫土中，由动荷载作用所产生的应力比静载的小；不平整的面层，动力系数超过1，并随着面层不平整度的增加而增长。

运行车辆对路面作用的特点是时间短、接触应力增长速度快。荷载对面层表面的作用时间等于 $0.01\sim 0.05\text{s}$ （秒），而压力增长速度—— $(150\sim 200)10^5\text{Pa/s}$ 。荷载作用时间沿路面厚度而增加，在下垫土的表面为 $0.1\sim 0.3\text{s}$ ，加荷速度则减小到 $(1\sim 20)10^5\text{Pa/s}$ 〔9〕。这种路面加荷条件要求在路面计算和结构设计时必须考虑结构层材料的动力特性。路

面计算方法以静止的应力-应变状态为基础，而动态因素则借助于修正系数来考虑。

气候因素对路面状态及其耐久性有很大影响。降温和升温、太阳辐射、大气降水、地下水等是危害最大的一些因素。

周围环境温度的变化引起面层变形：温度裂缝、翘曲和冻胀。用沥青结合的材料建成的结构层在低温时变成脆性层，在高温时则变成塑性层。

在太阳辐射的影响下，不仅面层变热，而且使有机结合料迅速老化。在路面下路基发出冻结的地区，在春季形成融化的、被水饱和的土夹层，它使面层的强度降低。

地下水是路面下层在春季和秋季过湿的主要水源，而在某些路段则是全年过湿的主要水源。

大气降水，特别是降雨，降低面层的联结质量，使结构层材料的各别细颗粒被冲刷。降水向路面和路基内部渗透，使路面和路基的强度指标降低。断裂、角的折断、在下垫土不均匀冻胀时板的沉陷或隆起等，都是刚性（混凝土）路面变形的形式。对于柔性面层，表面磨损、波浪、坑洞、辙槽、贯穿的裂隙、沉陷等是最有代表性的。

磨损——由于运输荷载作用使面层厚度减薄，它是使用过程中变形的形式。

波浪——面层表面上许多有规律地相互交替的高峰或低洼型的不平整，通常出现在低粘性材料（碎石、砾石）的道路上，有时也出现在用有机结合料处治的道路上。

坑洞——具有明显边缘的局部坑状破坏，是由于车辆通过不平整处时，车轮的冲击或面层各别颗粒之间的粘结遭到破坏。

贯穿裂隙——面层断面有明显形变的、贯穿路面全厚的完全破坏，在下垫土过湿期间，道路结构与荷载不相适应时形成。

沉陷——面层断面具有明显圆形边缘的低洼变形。产生沉陷的主要原因是路面强度不足或路面下的路基施工质量差。在由整体性材料建成的面层上，沉陷伴有网裂。

在柔性路面的各种类型形变中，只有磨损对车辆以计算速度或最佳速度运行不形成明显的障碍，其余的所有形变对运行条件和安全均有不良影响。

1.3 路面状态对汽车运输 使用指标的影响

汽车运行速度、它们在大修前的行程、燃料的消耗、轮胎的磨损，而最终体现为运输成本，它与路面的强度和平整度以及车轮和面层的附着系数直接有关。换言之，道路的运输-使用指标决定汽车运输工作的技术-经济指标。

当然，面层不可能长时间始终保持平整，因为在汽车车轮和自然-气候因素作用下，面层是在不断发生变化的。由于残余形变的累积，面层状态逐渐恶化。在其他条件相同的情况下，路面强度愈低，残余形变的累积和面层的破坏发生得愈快。随着不平整度的增加，汽车的摆动加剧，这就迫使驾驶员为了提高运行的安全性和舒适性而降低车速，从而使运输旅客和货物的费用提高，汽车运输的生产率降低。

哈尔科夫公路学院（ХАДИ）（在 А.К. 毕鲁利亚教授领导下）以及莫斯科公路学院（МАДИ）（在 Н.Н. 依万诺夫教授领导下）所进行的多年研究，使得有可能弄清路面强

度、平整度和车流运行速度之间的相互关系(表1)。图2表示面层平整度和最大可能车速的关系(按ХАДИ的资料)。

面层状态与道路运输使用指标的关系

表1

道路面层总的状态	破坏程度 占面积%	强度系数 k	按颠簸仪读数的面层 平整度(cm/km)	车流平均车速 $v_{cp}(km/h)$
好的(满意的)	0~15	1	<300	30~55
稠密的裂缝和网裂	15~35	1~0.85	300~1000	55~35
网裂和个别破坏	35~50	0.85~0.8	>1000	35~25
大量破坏	50~70	<0.8	>1200	25~20

注: km/h等于 $\frac{1}{3.6}$ m/s.

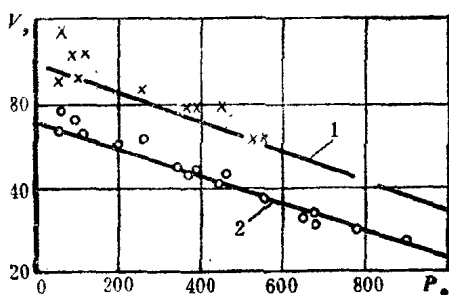


图2 最大允许车速与路面平整度的关系

1-汽车ГАЗ-21, 2-汽车ГАЗ-51

保证了所要求的路面强度就能保证足够的面层平整度和规定的运行车速。通常以弹性模量表征的路面强度,在这种情况下是一个综合性的指标。因此,可以按强度系数 K 或按面层平整度来判别道路的使用状态及定出维修措施。例如,对于高级面层,在中等使用条件下颠簸累积仪的读数大于300cm/km时,路面状态被认为是不满意的,并规定要进

行中修或大修。

与其他指标相比，车轮和面层的附着力与气候因素及道路状态的关系更大。虽然附着力值首先取决于面层的粗糙度，然而在不利的道路条件下（结冰，严重污染），附着力值就可能不取决于面层表面质量而明显减小，从而使事故率增大（图3）。

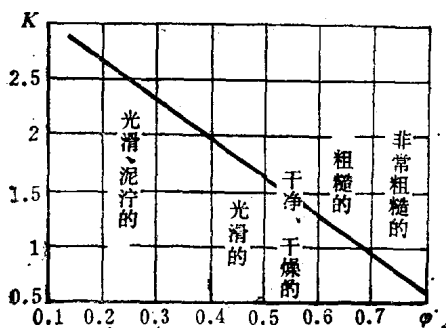


图3 事故率与面层状态的关系

为了使轮胎能和面层直接接触，必须从接触区中挤出大部分水份，挤出的效率取决于粗糙度凸出部之间沟渠体系的发达程度。增加大粗糙度沟渠的深度能降低轮胎和面层之间的动水压力，并改善轮胎和面层的附着力，特别在高速运行时更是如此。所以附着系数数值应根据运行条件和路段特性来规定^[17]。在任何情况下，对于潮湿表面，附着系数应不低于0.45。

高的附着质量通过选择耐磨光的面层集料以及做成较高的粗糙度来达到。采用中粒式和粗粒式沥青混凝土混合料能保证面层有较高粗糙度。在某些道路上还采用不会在表面上

积水的多孔隙面层。然而，这种粗糙度在使用过程中会很快磨掉，它必须定期地恢复。在水泥混凝土面层上粗糙的小沟可在其铺设过程中或在硬化后做成。

虽然，这类措施使滚动阻力增加，从汽车工作的经济性观点看是不希望这样的，但它们能保证运行安全。众所周知，滚动阻力随轮胎和面层刚度的提高而降低。路面的变形性愈小（弹性模量愈大），则滚动阻力愈小。这样，改用较高级的面层类型，即使面层具有较高的粗糙度，在任何情况下也将能降低滚动阻力。

1.4 结构层，路面分类

路面结构设计由二个相互联系、依次完成的阶段所组成：结构设计和计算。同时，路基和路面的设计必须协同进行，因为只有在这种情况下，才能保证设计出可靠、合理的方案。

各结构层的分配能力使施加在面层表面的荷载影响沿体系厚度而减小，这就有可能把路面设计成由若干强度不同的层次所组成。

根据应力沿路面厚度分布的理论和试验研究，我们可以把路面分成三个结构层。

1) 磨损层 对它应提出粗糙度、耐磨性、平整度、抗剪性等要求。这一层按其磨损程度定期恢复。

2) 面层的主层 随运输荷载的大小而定，主层厚度 $0.08 \sim 0.15\text{m}$ 。在该层作用着很大的垂直（压缩）和水平（拉和剪切）应力，所以主层应具有高的变形稳定性和水稳性。

3)路面基层 为分配压力到土基上设置的。在这层中由运输荷载引起的应力值相对迅速地减小。基层经常由几个结构层组成。在不利的天文、土质和气候条件下，用水稳性好的地方材料作基层补充层，它同时起防冻层、排水层等作用〔6、13〕。

下垫土处在基层下，对它应仔细地压实并保证排水。

可采用各种石料和结合料来作路面基层结构层。按两种意图来选择石料和结合料。第一种意图：在不利的土质和气候条件下，为提高承载力，规定用结合料加固基层的各层。第二种意图是利用地方天然石料及工业废料，尽可能使公路造价大大降低。

结构层设计应保证材料沿厚度合理设置以及各层的造价随深度的增加而降低。换言之，在路面结构中，材料的强度随深度而递减，以与活载产生的应力沿深度衰减相适应。相邻层次弹性模量最合理的比值在1.5~3的范围内。各结构层沿深度这样布置是通用的，但不总是最佳的。在设计实践中，特别在路面改建时，经常会遇到这样的情况，即坚固层不仅设置在上层，而且还设置在下层。Я.А.卡罗日斯基首先提出：路面可以设计成各结构层的强度沿深度有各种不同变化。

对沥青混凝土路面基层的各个结构层应提出一定的要求，Н.Б.高莱娄雪夫将这些要求归纳成下列几点：

- 1 基层应是在弹性阶段工作的柔性无缝板。
- 2 基层和沥青混凝土面层的热物理性质和力学性质不应有明显差别。此外，必须使基层的抗冻性和弹性模量比面层小，而水稳性、变形性和线膨胀尽可能相等。

所采用的大多数基层，特别是由弱粘性或无粘性材料建

成的基层，在很多方面不符合这些要求。

为了提高重交通道路上路面的稳定性，可采用很厚的（0.2~0.3m）多孔沥青混凝土来代替碎石基层。为了减少有机结合料的用量，沥青混凝土面层铺筑在刚性或半刚性基层上。近年来，为此目的常采用能提高结构抗裂性的低强度水泥混凝土。

作为例子，我们研究二种重交通道路的路面结构。在基辅环行路（图4a），在路基上用细砂铺设了厚0.15m的基层补充层（花岗石石屑），它能提高铺在混凝土板下体系的刚

路面分类

表 2

道路面层类型	材料的主要种类及铺设方法	适用范围
1	2	3
高 级	水泥混凝土（整体的和装配的）热拌沥青混凝土（标号I和II），对于道路气候区的I区也用温拌沥青混凝土 嵌花式块料铺砌路面和条石路面热拌沥青混凝土（标号III和IV）	I和II级道路及在III级道路技术经济论证时 年降水量小于400mm的IV和V道路气候区
次高级	温拌（除I气候区外）和冷拌沥青混凝土热拌煤沥青混凝土（标号III和IV） 厂拌或贯入法、半贯入法或路拌法沥青和煤沥青处治的碎石和砾石材料 厂拌法、贯入法和半贯入法的沥青和煤沥青处治粒径大于5mm的坚固碎石厂拌法沥青乳液和水泥处治的粗岩屑（大于40mm）砂土或亚砂土过渡式面层上的表面处治	在II、III道路气候区中的III和IV级道路 III~V级道路 III和IV级道路
过渡式	施工时压实的碎石、砾石和基它坚固的矿料 结合料处治的土和地方性低强度石料，单独处治及综合处治 拳石和碎块铺砌路面	IV、V级道路并首先是III级道路
低 级	用各种地方材料加固或改善的土整体式的和轨道式的地方材料（原木的、枕木的、木排的）	V级道路

度。由 200~250 号水泥混凝土建成的基层是结构的主要承重层。在基铺一波里斯波里快速道路上（图46）基层采用75号贫混凝土，而含沥青的各结构层的总厚度提高到0.175m。

所有的路面结构均可划分成各种组、等级或类型。

最常见的是按使用指标分类。根据运行舒适性及速度的保证程度、残余形变累积的速度，面层可划分成高级、次高级的、过渡式和低级（表2）。

路面按其力学性质可划分成两类：刚性的和柔性的。路面中有一层或几层，其抗弯强度和弹性模量实际上不受温度和湿度影响，并在整个使用期内很少变化的，被认为是刚性的〔9〕。具有水泥混凝土和钢筋混凝土面层和基层的路面属于刚性的。

各层的抗弯强度和弹性模量明显取决于温度和湿度的路面（沥青混凝土、煤沥青混凝土等）或是承重层不能抗弯拉的路面（碎石、砾石等），称为柔性的。

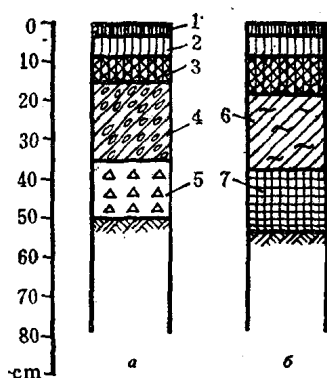


图4 半刚性基层的路面

1-沥青混凝土面层上层；2-粗粒式沥青混凝土面层下层；3-黑色碎石；4-200号水泥混凝土；5-花岗岩石屑；6-75号水泥混凝土；7-高炉矿渣。

① 原文为45——译者。

2. 路面基础^①设计

2.1 活载作用下的路面土基状况

路面只有工作在可逆变形阶段才能保证汽车的高速运行。

路面的强度、平整度和耐久性取决于下垫土的承载能力和变形程度。下垫土承受着车辆由上层传递下来的荷载。土在荷载下的变形程度和累积值在很大程度上取决于其类别和物理-力学性质。根据在路基中的使用条件,土可分为含石块土、碎石土、砾石土、砂土、亚砂土、亚粘土和粘土^[16]。

非粘性土——含石块土、碎石土、砂土在水分的作用下能保持稳定,饱水对其承载能力影响小。亚砂土和亚粘土是良好的路基材料,但当含大量粉粒时,这种土易于形成冻胀。粘性土一般在干燥地区和潮湿时间不长的地区使用,因为这类土在过湿的情况下会变成流动状态。

土性质的多样性以及实际测定应力和形变值的困难导致人们对其性质进行一些理想化假定,即摒弃其某些次要性质,而只注意材料的主要性质或在荷载作用下的状况特征。土的计算模型就是根据这些前提而采用的。模型的力学性质是已知的,因此可以用建筑力学和土力学的方法来计算土基的稳定性。模型反映土的主要力学性质,而次要性质或者不考虑,或者通过修正系数来解决。

①基础指路面下的土基、整个路基以及路堤下的地基——编注。