

柔性路面 结构设计方法

林 绣 贤 编 著

人 民 交 通 出 版 社

柔性路面结构设计方法

Rouxing Lumian Jiegou Sheji Fangfa

林 绣 贤 编 著

人 民 交 通 出 版 社

内 容 提 要

本书系柔性路面设计理论及结构设计方法专著，具有较高的学术价值。本书介绍的我国柔性路面科研成果共获8项奖励，有两项获国家级奖。

本书共两篇，其内容包括：第一篇述评国际上有影响的柔性路面设计理论及设计方法；第二篇介绍我国柔性路面设计方法的发展，重点介绍已列入公路及城市柔性路面设计规范的新设计方法，并对有关问题一一加以论证。此外，还对半刚性基层沥青路面结构设计方法提出了设想，可供研究人员参考。

本书可供公路、城市道路、林业道路、厂矿道路工程技术人员及有关院校师生参考。

柔性路面结构设计方法

林绣贤 编著

责任编辑 武崇理

封面设计 梁毓英

插图设计 赵耀华

技术设计 周 圆

责任校对 张 莹

人民交通出版社出版发行

(北京和平里东街10号)

各地新华书店经销

人民交通出版社印刷厂印刷

开本：850×1168 1/32 印张：21.25 插页：5 字数：543千

1988年11月 第1版

1988年11月 第1版 第1次印刷

印数：0001—8,000册 定价：10.90元

出版说明

本书是柔性路面设计理论和结构设计方法专著。集我国道路工作者（包括作者在内）柔性路面科研的主要成果。书中所介绍的内容共获8项奖励，其中有两项获国家级奖，柔性路面设计方法获1978年全国科技大会重大贡献奖。

本书详细介绍了柔性路面设计理论、结构设计方法的发展及我国的研究历史；重点介绍已列入公路及城市柔性路面设计规范的新设计法。书中有许多内容系我国自己的科研成果，具有创造性，有较高的学术价值。书中还列有许多示例及计算机辅助设计程序，便于读者理解和运用，也有助于贯彻新的规范。

本书的又一特点是，作者用相当的篇幅对国际上有影响的柔性路面设计理论和设计方法（如美国的CBR、AASHO、AI法，英荷壳牌石油公司法，苏联的理论分析法，等等）进行了述评。作者还对其中的一些方法提出改进建议，使之趋于完善，这是难能可贵的。

本书的出版，不仅对我国道路工作者有所裨益，而且对国际柔性路面设计理论及结构设计方法的发展和学术交流也将起促进作用。

1979/12/24

前 言

柔性路面结构设计方法的研究，国际上已有80余年的历史，各国专家学者，因时因地提出各自的设计方法，种类繁多，资料浩瀚，令人目眩。我国亦有30年的研究过程，50年代曾列为国家12年远景科研规划第3512项，60年代则列为国家科委重点项目第2415项，70年代交通部公路局下达了对该设计方法增补抗弯拉抗剪切指标研究的任务，80年代城乡建设环境保护部又列了城市道路柔性路面设计方法和指标的研究课题，各方行动，众人参加，论著既多，争鸣亦欢，作者有幸，自始迄今，参与其事，探讨观摩，时有所得，聊集成书，以献读者，冀有利社会主义四化建设。

全书分两篇：第一篇述评国外方法，旨在弄清各家方法的来龙去脉，因果关系，或先叙后评，或夹叙夹评，前后对比，综合归纳，提出建议。其中：第一章主要介绍柔性路面设计方法的历史和时代划分；第二章则对古典理论法作出评论；第三、四两章重点讨论美国的CBR、AASHO、日本国等的经验法，经剖析证明，各法中以AASHO法最为完善，但使用不便，为此，作者对该法进行研究后提出既符合原结果又便于工程上实际应用的合理而简化的计算公式；第五章述评了国际上较为成熟的壳牌、美国地沥青协会、比利时、苏联等的理论分析法，证明各家方法既各有特色又互有短长，可去粗存精，供建立我国设计法的借鉴。通过第一篇的阅读，读者对国外诸方法的演变历史将有系统的了解，对作者的述评恰当与否，自可作出公论。第二篇介绍并论证国内方法，对30年来的发展，从任务提出，研究结果，解决途径到存在问题，按1958年、1966年、1978年规范和新规范的顺序，

分章叙述，逐节论证。其中：第六章评论1958年与1966年规范存在的问题；第七章介绍1978年规范修订的结果，并对旧路补强经验公式也作了理论的分析推导，且与国际上最有代表性的经验法作了比较，提出了合理的修订建议，统一了我国理论分析法与经验法的内在关系，以扩大其可能的使用范围；第八章重点介绍已编入公路柔性路面新规范和城市道路设计规范的多指标设计法，对其理论体系与基本公式的建立，计算点的确定，多层体系换算，参数的标准测定法与理论验证，设计轴载的确定与换算方法，不同道路等级设计指标及其容许值的确定，计算机辅助设计程序，诺谟图的应用等每一个问题的资料来源，道路实际情况的调查结论，理论分析的规律，实践与理论的联系方法，均一一作出论证；第九章专题讨论新旧土的分类方法，材料组成设计原则，土基和路面材料的有关参数问题和工地质量控制的测定方法，使材料组成设计、施工质量要求与路面结构设计取得密切的联系，成为一个整体，以期有利于新规范的应用；第十章对当前国内外正在积极进行研究的半刚性基层沥青路面的结构设计方法提出了设想，从结构选择，材料要求、防裂措施及今后应予研究的工作，作简要论述，起抛砖引玉作用。通过第二篇的阅读，读者对我国柔性路面设计方法的发展将一目了然，对其存在的问题及应予研究的课题，当可各尽己长，共同攻关，并对作者的建

议，给以斧正。

全书采用我国法定计量单位，并以符号表示，因属工程用书，新、旧单位换算中，重力加速度 g 系用 10m/s^2 ，以求简化，当推导国外原公式过程中，无法避免非法定单位时，则以文字表示，以资区别。

对促进本书编著与提供资料的单位和同志，作者表示衷心的感谢。限于个人水平，挂一漏万，在所难免，恳请批评指正。

林 绣 贤

目 录

第一篇 国外柔性路面设计方法述评

第一章 路面与路面设计方法	1
第一节 路面结构的发展.....	1
第二节 柔性路面设计方法简史.....	5
第二章 古典理论设计法	10
第一节 简介.....	10
第二节 评论.....	13
第三章 经验设计法 (一)	19
第一节 群指数设计法.....	20
第二节 马克里奥设计法.....	25
第三节 CBR 设计法	36
第四节 美国堪萨斯州设计法.....	60
第四章 经验设计法 (二)	69
第一节 AASHO 柔性路面设计法.....	69
第二节 美国地沥青协会设计法.....	114
第三节 日本沥青路面设计法.....	126
第五章 理论分析设计法	146
第一节 弹性层状体系理论在柔性路面设计中的应用.....	147
第二节 壳牌 (SHELL) 设计法.....	154
第三节 美国地沥青协会 (AI) 设计法.....	176
第四节 比利时设计法.....	183
第五节 苏联柔性路面设计新法.....	200
第六节 综合评论.....	239

第二篇 我国柔性路面结构 设计方法论证

第六章	1978年以前的柔性路面设计方法	253
第一节	历史的回顾.....	253
第二节	1958年路面设计规范的基本公式.....	256
第三节	1966年路面设计规范的基本公式.....	263
第四节	多层体系的应力与变形公式.....	274
第五节	设计标准.....	280
第六节	道路气候区划与计算参数.....	285
第七章	1978年柔性路面设计规范的方法	293
第一节	基本公式.....	293
第二节	容许弯沉值.....	295
第三节	不同车型的换算方法.....	300
第四节	弯沉值综合修正系数.....	314
第五节	多层体系换算.....	321
第六节	公路自然区划.....	326
第七节	设计参数.....	332
第八节	评论.....	336
第九节	旧路补强经验公式.....	345
第八章	柔性路面结构设计新法	370
第一节	方法简介.....	370
第二节	理论体系、设计指标及计算点.....	376
第三节	多层体系换算新法.....	393
第四节	基本理论的实验验证.....	401
第五节	设计参数的测定方法与要求.....	423
第六节	设计指标容许值的确定.....	427
第七节	旧路补强设计.....	445
第八节	计算机设计与验算程序及其示例.....	457

第九节	三层体系应力与弯沉诺谟图及其使用示例	488
第九章	土基与路面材料设计参数的有关问题	514
第一节	路基土分类	514
第二节	土基压实标准	533
第三节	土基回弹模量	546
第四节	路面材料集料组成设计	560
第五节	结合料最佳剂量的确定	588
第六节	路面材料的有关参数	597
第十章	半刚性基层沥青路面结构设计方法的设想	629
第一节	合理结构选择的原则	629
第二节	材料组成设计的原则	641
第三节	防止反射性裂缝的技术措施	647
第四节	应进一步研究的问题	661
	主要参考文献	666

第一篇

国外柔性路面设计方法述评

第一章 路面与路面设计方法

第一节 路面结构的发展

一、路面的简史

路面是随着交通的发展而发展的。在1830年英国最初的载客铁路通车以前,交通是处于马车时代,所以古代的路面是以大条石层层平铺而成。当时人们认为大而平的条石能够承受荷载,但多不舒适。到古罗马时代,人们在条石基础上先铺细粒料作垫层,再在其上铺一层条石,以和缓面层的坎坷。直到18世纪末叶泰雷萨格(Trasaguet)对条石面层进行了革命,提出直接在条石基础上采用碎石面层的施工法。泰雷萨格被称为近代路面的创始者。继而1802年英国又以手摆块石代替了条石基础,直接在手摆块石上修碎石面层。1815年马克当(Macadam)又取消了手摆块石,提出了水结碎石路面结构,被称为马克当式路面。1817年法国出现了大型马拉路碾,为碎石路面的铺筑起了促进作用。至此,路面结构进入了碎石路面的时代。图1-1-1为初期路面结构示意图。

至于沥青路面的起源,乃由于岩沥青的发现及其利用,以1712年在瑞士发现的岩沥青为契机,其后在德、法等国相继发现。1850年前后,法国首先把岩沥青用于道路路面,1854年马娄(L.MaLo)在巴黎修筑了接近于现在的薄层沥青路面,可以称之为热铺岩沥青路面之始。

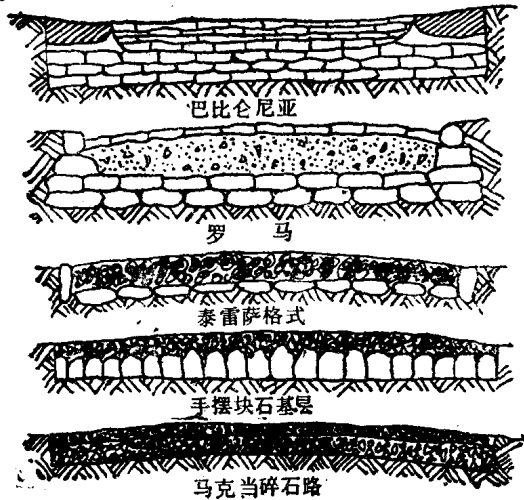


图1-1-1 初期的路面结构

当时被利用的岩沥青，是渗透有6~10%沥青成分的石灰岩，把它碎成细粒，加热摊铺碾压，即成沥青路面。其最大粒径只有2.5mm，通过0.074mm的粉粒达40%以上，由于当时的交通还处于铁路时代，道路上仍以马车交通为主，所以岩沥青路面能充分发挥其机能，成为先进的路面结构。

美国到1850年以后才从法国、瑞士输入大量岩沥青，以东部为中心修筑岩沥青路面，至1900年按波尔门(T.H.Boorman)的统计，在纽约市有记录可查者也仅修建了25000m²而已。但1871年德斯门特(E.J.Desdment)在纽约市把砂、石灰石粉和特尼里特湖沥青用以铺筑沥青路面获得成功，得到了专利施工法，这是近代热铺湖沥青路面之始。

在1872年，华盛顿市把过去岩沥青路面施工法和应用石灰石粉、砂、掺以湖沥青及石油残渣油的施工法作比较，证明除岩沥青因石粉含量太多容易打滑外，两者都能适应当时交通的要求。这可以说是岩沥青与湖沥青修筑试验路面的先例。试验路使用情

况成为路面材料从岩沥青转为湖沥青的依据，这也是石油残渣油应用于路面的开端。

1885年发明以汽油为动力燃料的汽车，1887年发明气压轮胎，1895年纽约州罗切斯特的乔治·赛尔登律师获得用汽油驱动车辆的专利权。并于1899年出售了专利权，汽车工业开始兴起。故一般认为1900年是铁路交通时代进入铁路运输与汽车运输的混合交通时代。同时，1900年也是汽车交通时代的开始。由于汽车荷载与马车不同，为了适应荷载的需要，当年美国又在石粉、砂、湖沥青混合料中加进了碎石，发明了瓦雷奈特式 (Warrenite-bitulithic) 路面，即下层为粗级配沥青混凝土与上层沥青砂两层摊铺一次碾压而成的双层式沥青混凝土路面，这是沥青混凝土路面的由来。至1905年美国托皮卡市产生了托皮卡 (Topeka) 路面^①作为沥青路面的耐磨层，使沥青路面结构更趋完善。

1911年美国最高法院作出裁决，允许各汽车厂可以自由制造汽车，交通运输正式进入了汽车交通时代，对路面的性能提出了更高的要求。为此，1920年出现了沥青混合料的最初试验法——哈-费氏 (Hubbard-Field) 方法。1930年生产了沥青路面摊铺机，1934年开始修建高速公路，从此，沥青路面成为现代高等级路面的主要类型。

另一方面，自1824年发明硅酸盐水泥 (波特兰水泥)，1876年法国初次修筑水泥混凝土路面以来，此类路面别树一帜，成为与沥青类路面相辅相成的另一主要类型路面，二者各自发挥优势。

对这两类路面，过去根据力学观点，把水泥混凝土路面称之为刚性路面，而把以粒料基层为主的沥青路面及一般的粒料路面统称之为柔性路面。但近来由于汽车轮载的加重、交通量的迅速发展、粒料基层已开始不能适应重载的需要，采用以沥青、水泥、石灰等掺加剂稳定基层的结构在两类路面中都日益增多，基层刚度的提高，使沥青路面结构发生了大的变革，而刚性路面表层也有向塑性化发展的趋势。因此，刚、柔分家的形势已被打

① 托皮卡属细粒式沥青混凝土，最大粒径为10~13mm，<2.5mm颗粒占65~80%，而修正托皮卡乃指<2.5mm颗粒为50~65%者。

破，刚、柔结合的路面结构必然成为发展的方向。但目前过渡时期，仍把具有沥青面层的各种路面结构，都归属于柔性路面，列入本书讨论的范围。

二、路面结构

前已述及，路面的结构是随着交通的发展而改变的，从大的来说，路面结构可分为面层、基层、垫层、路基四大部分，如图1-1-2所示。

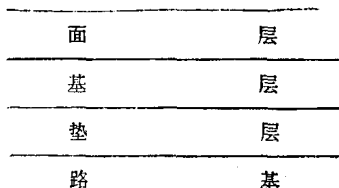


图1-1-2 路面结构示意图

1. 面层：直接承受汽车荷载的重复作用并

把荷载传布到下部。故面层本身应具有相应的强度，它的表面应当平整、抗滑，以保证汽车行驶的要求速度和安全舒适，还要抵抗轮载造成的剥落与磨耗，同时它是直接受周围环境和气候的影响，对环境的变化应具有抵抗的能力，故既要密实防水，以免路表水渗入下层，造成路面结构的整体损坏，还要有好的温度稳定性，防止开裂与车辙。

在轻交通时代，面层只有一层，例如碎石面层，它主要起传布汽车荷载的作用，要求平整、密实，以适应汽车的行驶和保护基层，但对抗剥落与磨耗很难胜任。为此，以后往往在其上加铺沥青表处层或其他材料的磨耗层（例如砂土磨耗层）以分担其一部分功能。随着交通量和交通荷载的增大，单层的面层已经不具有上述的全部功能。为此，随着交通的发展，路面等级也相应提高，沥青面层也可由数层组成。磨耗层主要起耐温、耐磨和防滑作用，称高强耐磨防滑层，其材料组成与材质有特殊的要求。其下分为面层上层与面层下层。前者特别注意密实防水，一般用密级配沥青混凝土，后者又称联结层，一般用粗级配沥青混凝土或沥青碎石、沥青贯入等，以保证结构层形成一个整体，防止面层上层滑移和变形。上、下面层除保证自身应有的强度外，并共

同把荷载传到基层。当然，根据交通状况也可不设面层下层。

2. 基层：直接承受从面层传来的荷载，并再传布到下层。在轻交通时代，基层往往只有一层，并用就地所取材料修筑，例如天然砂砾、碎石等。随着交通的发展，基层也可由数层组成，即上基层、底基层。而且对上基层的材料也提出了较严格的要求，例如无机结合料稳定类材料等；底基层则用当地材料或无机结合料改善的材料。

3. 垫层：在路基水温状况不良时，为改善路面结构工作条件而设。根据其功能不同，分为排水层、隔水层、防冻层、防污层等，分别采用不同的材料修筑。

4. 路基：为路面结构的基础。对湿软土基应事先进行改善处理，以适应路面结构的最低要求。

高等级路面结构的横断面如图1-1-3所示。

本书将按上图的统一名词论述各方面的问题。

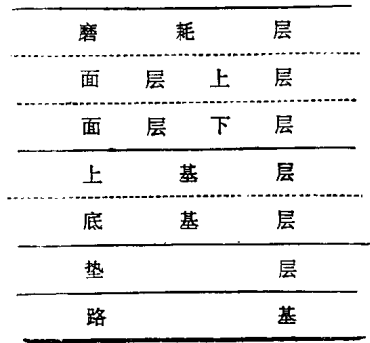


图1-1-3 高等级路面结构示意图

第二节 柔性路面设计方法简史

设计方法的发展是随着交通的发展与路面材料的种类而改变。在条石路面时期，还谈不上有什么设计方法，到了碎石路面特别是进入沥青路面时代，才开始有设计方法。

前已述及，1900年是汽车交通时代的开始，1901年美国麻省道路委员会第八次年会上就提出了第一个路面设计方法的公式，尔后40年提出了各种各样的设计公式，至1940年苟德培 (Goldbeck) 公式为止，均属于初期的古典理论公式，其特点都是以

轮载分布到土基上应力大小为依据，可以说这是路面设计方法的第一代。

初期古典理论公式得不到继续发展的原因，一方面是理论基础薄弱，但更主要的是没有正确测定土基承载力的方法。为此，后来的研究重点转到土基承载力的评价上。

1929年美国公路管理局提出了土的道路工程分类法（PRA分类法），同年，美国加州道路局开创了路基土与粒料材料加州承载比（CBR）的相对强度试验法，并于1928~1942年进行了十多年的道路路面调查，1942年由波特（O.J.Porter）根据道路实际使用的总结，把土的 CBR 值与路面的经验厚度间建立了关系，得出了图解，提出了 CBR 设计法。该法简单明了，因而迫使初期理论公式让位于建立在土质学与土力学发展基础上的经验法。经验法中除 CBR 设计法外，还有从1929年开始至1947年完成的按土的分类指数法为基础的经验厚度表；从美国地沥青协会的哈-费氏（Hubbard-Field）的土基承载板试验法开始而发展至1943~1947年形成的加拿大马克里奥（McLeod）设计法；1948年的加州维姆（Hveem）法；1949年的美国堪萨斯州（Kansas）的三轴仪法；等等，其中心内容都是要解决土基强度问题。

特别是 CBR 设计法，由于第二次世界大战中为美国陆军工兵部队所认可，并利用布辛氏（J.Boussinesq）均匀体剪力公式发展成诺谟图，广泛采用于机场道面设计，继而经过改造又回到公路路面设计中使用，为世界各国所重视，成为当时路面设计的主要方法。CBR 设计法所以如此普及，关键在于它开创了简便的 CBR 试验法，并有广泛路面实际使用的调查资料，也就是说它建立了室内试验与现场实践间的联系。可以说，这是第二代设计方法中的代表。但 CBR 设计法只决定路面的总厚度，而且当时是从粒料基层为主的薄沥青面层类路面总结而得，它只能适应于当时的交通状况，而且对面层、基层的质量难以反映。第二次世界大战后，交通量激增，轮载加重，造成了路面的大量损坏，设计法被迫要进行彻底的改造。为此，根据1946年美国各州

公路工作者协会 (AASHO) 道路运输委员会提出的劝告, 美国开始进行大规模尺寸道路试验, 至1955年美国西部各州公路工作者协会 (WASHO) 提出试验路成果, 同年, AASHO 试验路也开始施工, 积累了大量的实践经验, 并于1962年提出了系统成果。AASHO 试验路不是采用理论先行, 实验辅助的一般研究途径, 而是根据大规模试验路的实际行车运行结果, 抽出对路面有破坏影响的主要因素, 例如不平整度、裂纹、车辙等, 把它组合成模型, 并根据实验结果予以统计分析, 作出评价, 建立基本方程, 所以, 它是以使用性为基础的经验设计法。它给世界各国以空前的影响, 成为近代经验设计法的基础。尔后十多年, 各国道路技术人员对此成果争相研究, 互相渗透, 提出各自的经验设计法。可以说 AASHO 设计法是柔性路面设计法中第三代的代表。

AASHO 试验路虽然进行了大规模的试验, 但也只解决了路面设计中一部分的问题, 尽管是很有价值的一部分。因为试验路终归不能包括所有的因素, 更主要的是, 由于重型交通的发展, 以各种稳定材料代替了传统的粒料基层后, 路面结构发生了重大的变革, 过去把理论作为配角的经验设计方法更显得无能为力。因此对 AASHO 试验结果的研究热潮告一段落的1970年左右, 为了适应各种新材料的发展和路面结构的变革, 建议采用理论分析法进行路面结构设计的呼声又全面活跃起来。

对造成古典理论法难以前进的两大问题, 经验设计法只集中力量在解决土基承载力问题, 而理论基础方面问题, 有志者也已着手研究, 为有朝一日应用理论分析法准备了条件。早在1943年波米斯特 (Burmister) 就发表了弹性层状体系理论, 冲破了经验设计法无从反映路面层状性质的局限性, 为柔性路面设计理论分析法奠定了基础。虽然在波米斯特之前, 人们对以均匀体弹性理论为基础应用于路面设计作过探索, 例如苏联初期的设计方法; 对双层弹性体系理论也有人严密地解算过, 例如日本的松村孙治。但把层状体系理论应用于路面设计, 国际上公认始于波米斯特, 从此, 才有意识地把路面设计作为理论研究。至1945年波

米斯特根据圆形荷载下路表的弯沉值绘成了诺谟图，又发表了与路面结构基本形式相对应的三层体系应力计算方法，理论基础更为巩固。随着电子计算机的发展，理论研究进一步持续地前进了。1948年福克斯 (Fox) 和亨格 (Hank) 等得出了应力的数值解，1949年奥德曼 (Odemark) 进行了弯沉量与曲率半径的研究，1951年阿勘姆 (Acum) 和福克斯求得三层体系各界面中心上的应力，直至1962年琼斯 (Jones) 和皮提 (Peattie) 发表了便于实用的计算图表，使理论法进入了实用阶段。

1963年英荷壳牌石油公司 (SHELL) 把理论计算结果和 WASHO、AASHO 试验路成果相结合，提出了理论分析法的设计方案，成为当代第一家以弹性层状体系理论为基础的理论分析法设计柔性路面，继此，各国竞相研究，不断补充完善，至1977年第四届沥青路面结构设计会议上，理论分析法更成为柔性路面设计方法的新潮流，占据了主导地位，相继有苏联、比利时等国都提出了比较完整的设计方案，特别是历来以经验法闻名于世的美国地沥青协会的 (AI) 设计手册，1981年第九版也全面修改为以弹性层状体系理论为基础的方法，其影响更大。

以弹性层状体系理论为基础的近代理论分析法，所以得到这么大的发展，一方面是由于电子计算机的迅速发展，复杂的理论数值计算变得比较容易了，接连开发的电子计算机应用程序，使不懂弹性层状体系理论的技术人员也能计算路面结构内的应力和应变，另一方面是由于参数测定方法的进步。当然，理论分析法在实用时，也大量对照了过去的实践经验，特别是 AASHO 试验路的实验资料，对理论分析法的实际使用起到了促进作用，所以近代的理论分析法实际是理论分析与实践经验的综合。评价各家理论分析法的优劣，不仅看其理论分析的先进性如何，更要看它与实践联系的水平如何。因此，理论分析法也可称之为半理论半经验的方法。这应是柔性路面设计方法的第四代。

当然，理论分析也不是万能的，特别它不可能把自然条件和所有路面材料的特点都归纳进去，目前还在不断地调整充实、缩