

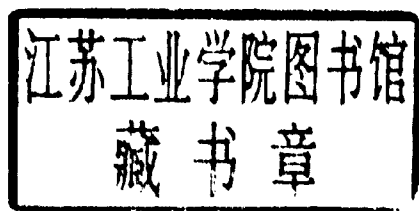
姜昌山 编著

机场水泥混凝土 道面设计方法

中国民航机场建设总公司

机场水泥混凝土道面设计方法

姜昌山 编著



中国民航机场建设总公司

前 言

《民用航空运输机场水泥混凝土道面设计规范》(MHJ 5004—95)(为便于叙述,以下在本书正文中简称为《规范》)已于1995年7月1日由民航总局发布实施。本书是为配合该规范的实施而编写的。本书作者是该规范的主要起草人之一,参加了《规范》编写的全过程。作者有较高的理论水平,有较丰富的实践经验,在书中详细介绍了《规范》中各种规定的背景和原由,总结了国内外水泥混凝土道面设计的方法和经验,提供了许多有价值的参考资料;同时对不少技术问题提出了他个人的分析、见解和建议。相信本书能够有助于设计人员更好地理解和运用本规范,提高民用机场刚性道面的设计水平。书中不当之处,诚请有关专家和读者给予批评指正。

民航总局基建机场司卓乐熙高级工程师审阅了本书,并提出了许多宝贵的修改意见,在此,谨致衷心的感谢。

中国民航机场建设总公司

1996年5月

目 录

第一章 概论	1
1.1 水泥混凝土道面的特点和适用场合	1
1.2 水泥混凝土道面的设计理论和方法	3
1.3 水泥混凝土道面的使用要求和设计任务	7
第二章 设计参数	9
2.1 设计荷载	9
2.2 设计使用年限	10
2.3 年运行次数换算	11
2.4 设计飞机累计作用次数	13
2.5 土基反应模量	14
2.6 基层顶面反应模量	16
2.7 混凝土设计强度	19
2.8 混凝土弯拉弹性模量和泊松比	20
第三章 结构层组合设计	22
3.1 土基	22
3.2 垫层	25
3.3 基层	29
3.4 水泥混凝土板	34
第四章 素混凝土板厚计算	41
4.1 临界荷位	41
4.2 混凝土弯拉疲劳强度	41
4.3 荷载应力计算	43
4.4 板厚设计标准	44
4.5 跑道混凝土板的减薄	45
第五章 分块设计、接缝设计和接缝材料	48
5.1 分块设计	48
5.2 接缝设计	50
5.3 接缝材料	56
第六章 加筋混凝土板设计	58
6.1 适用场合和厚度计算	58
6.2 加筋量及钢筋布置	58
6.3 接缝设置	58
第七章 水泥混凝土加铺层设计	60
7.1 概述	60

7.2	旧混凝土道面的调查与测试·····	60
7.3	旧混凝土道面参数·····	61
7.4	加铺层结构形式·····	63
7.5	加铺层厚度计算·····	65
7.6	接缝设计和加筋设计·····	65
参考文献 ·····		67

第一章 概 论

1.1 水泥混凝土道面的特点和适用场合

水泥混凝土道面(又称刚性道面)由水泥混凝土板(面层)、基层和垫层(仅在水温或土质状况不良地区设置)组成。其中水泥混凝土面层按组成材料和施工方法的不同有素混凝土、加筋混凝土、钢纤维混凝土、连续配筋混凝土、预应力钢筋混凝土、碾压混凝土和复合式混凝土等。面层下的基层主要有三种类型:贫混凝土、结合料(水泥、石灰、粉煤灰或沥青等)稳定土或结合料稳定粒料,以及粒料。垫层材料常用粒料或稳定土。

水泥混凝土道面与另一种高级道面——沥青混凝土道面相比,具有如下特点:

1. 刚度大、强度高、整体性好 水泥混凝土具有较高的刚度,其弹性模量达 25 000~40 000MPa,约为沥青混凝土弹性模量的 10~80 倍。道面水泥混凝土的抗弯拉强度达 4.0~5.5MPa,也是沥青混凝土的数倍。因此,水泥混凝土道面具有较高的承载力和荷载扩散能力,对基层和土基的强度要求较低,结构层总厚度一般小于沥青混凝土道面(冰冻地区除外)。

2. 稳定性、耐久性好 水泥混凝土的水稳定性、温度稳定性以及抵抗荷载重复作用的耐疲劳特性明显高于沥青混凝土,其强度能随时间而增长,而沥青混凝土会出现老化而强度不断降低。因此,水泥混凝土的使用寿命较长,对气候条件和水的侵害不太敏感。

3. 抗侵蚀能力强 水泥混凝土对航油、除冰剂等不敏感,有较强的抗侵蚀能力;而沥青混凝土道面抗侵蚀能力较差。

4. 养护费用少 由于水泥混凝土强度高,稳定性、耐久性好,在正常情况下,水泥混凝土道面的养护工作量和养护费用比沥青混凝土道面小。

5. 接缝多,平整度较低 接缝是水泥混凝土道面的薄弱之处,在设计、施工或养护不当时易于出现唧泥、错台和断裂等病害。接缝的存在难免引起飞机滑跑的跳动,影响飞机起降和行驶的平稳以及旅客的舒适。尤其在道面使用后期,由于接缝变形(缝隙增大、错台等)而使平整度降低,情况更为严重。

6. 施工进度较慢,不能立即开放运行 水泥混凝土道面施工速度较慢(碾压混凝土道面除外),而且需要较长的养生期以获得足够的强度。水泥混凝土道面浇筑完工后至少需要 14d 以上才能开放运行,而沥青混凝土道面不需要养护期,完工后即可使用。用水泥混凝土加铺旧道面时,道面必须中断使用,有时迫使机场关闭。另外,采用水泥混凝土道面在现有跑道邻近处扩建道面时(如延长跑道、增设联络滑行道或快速出口滑行道),有时也会影响飞行安全和航班正常。而采用沥青混凝土加铺层或沥青混凝土道面进行扩建,可以在不停航、不影响飞行安全的条件下利用夜间进行施工。

7. 维护困难 水泥混凝土道面一旦出现损坏,则比沥青混凝土道面难于修补,而且修补时可能会影响道面的正常使用。

8. 对超载敏感 水泥混凝土属脆性材料,一旦使用荷载超出设计荷载较多,混凝土板便可能断裂破坏。因此,水泥混凝土道面对偶尔使用较大机型或使用机型发生变化的适应

性较差。《国际民用航空公约附件十四——机场》规定，对柔性道面飞机等级序号 *ACN* 超过道面等级序号 *PCN* 不得大于 10%，而对刚性道面不得大于 5%

9. 不利于分期修建 采用水泥混凝土道面不利于在资金筹措困难或者对使用机型难以作出准确预测的情况下对道面进行分期修建。

根据上述特点，水泥混凝土道面更适合以下场合使用：

1. 荷载重、通行量大的道面 水泥混凝土道面具有较高的承载力和扩散荷载的能力、较好的耐疲劳作用特性（疲劳方程斜率较平缓）。因此，在荷载重、通行量大的机场，采用水泥混凝土道面时其结构厚度比沥青混凝土道面薄（尤其是在不需要考虑防冻的南方地区），其初期建设费用便接近于沥青混凝土道面。而沥青混凝土道面的使用寿命较短，取 30 年为计算比较期，沥青混凝土道面在计算期内需要加铺，而水泥混凝土道面一般不需要加铺，并且水泥混凝土道面的养护费用低。因此，按费用净现值法或等额年费用法计算，采用水泥混凝土道面更为经济。

2. 缺乏优质集料地区 由于水泥混凝土道面结构厚度比沥青混凝土道面薄，总的集料消耗量少于沥青混凝土道面。而且水泥混凝土对粗集料的要求比沥青混凝土低，可采用石灰石或机轧砾石修建出满足使用要求的道面。因此，在集料来源不足或缺乏优质集料地区，宜采用水泥混凝土道面。

3. 气候条件差或土基软弱地区 由于水泥混凝土道面的稳定性好，对极端温度变化（寒冷或炎热）、水的侵害或土基强度的减弱有较强的适应力，因此适合在气候条件不好的冰冻、炎热和多雨地区采用。另外，由于水泥混凝土道面扩散荷载能力较强，对土基的强度要求较低，因而适合土基软弱但比较均匀（只要不出现短波长的不均匀沉降）的地区采用。

4. 易于受到航油污染的道面 由于水泥混凝土道面对航油不敏感，而沥青混凝土道面在受到航油侵蚀时，其沥青会被溶解，从而造成道面的破坏，因此水泥混凝土道面适合于容易发生航油泄漏的站坪、停机坪等部位使用。

综上所述，水泥混凝土道面适用范围较广，因此在机场道面中得到广泛采用。在我国，飞行区等级指标为 4C 及 4C 以上的机场，基本上采用了水泥混凝土道面，只是近几年在新建西宁曹家堡机场和虹桥机场、南京大校场机场、桂林机场以及厦门机场等的道面加铺中，才开始采用沥青混凝土道面。尽管如此，采用水泥混凝土道面的一些缺点也不容忽视。而沥青混凝土道面具有无接缝、平整性好、飞机滑跑舒适，施工速度快、施工完可立即使用，用作加铺层不需要停航，养护修补容易，便于分期修建以及对地基的不均匀沉陷有一定程度的适应等优点。由于沥青混凝土道面具有这些优点，在国际上沥青混凝土道面得到更普遍的应用。据统计，国际上沥青混凝土跑道数量约为水泥混凝土跑道数量的二倍。笔者认为，随着国内沥青混凝土道面施工和维护技术的发展和成熟以及国产优质沥青性能的提高和产量的增加，在机场道面设计中需要改变过于偏重水泥混凝土道面的状况，根据不同场合慎重确定是否采用水泥混凝土道面。

在水泥混凝土道面中，以素混凝土（为与碾压混凝土相区别，称为普通混凝土更为恰当）道面应用最广泛，加筋混凝土道面一般只用于需要补强以控制混凝土板裂缝缝张开的特殊部位。连续配筋混凝土道面、预应力钢筋混凝土道面和钢纤维混凝土道面具有比普

通混凝土道面更优良的使用品质，在国外已有一些成功应用的先例。但是，由于这几种道面存在着造价较高、施工工艺较复杂的缺点，在我国相当一段时间内采用的可能性不大。碾压混凝土道面与普通混凝土道面相比，能节约水泥，且施工进度快，养护时间短，具有显著的经济效益。然而，如采用全厚度碾压混凝土，其表面平整度难以达到使用要求。根据公路部门的经验，可采用下层为碾压混凝土、上层为普通混凝土的复合式道面，或者在碾压混凝土道面上铺一层沥青磨耗层。碾压混凝土道（路）面在国外已得到一定的采用。我国公路部门也对此开展了深入系统的研究工作，并且在各地铺筑了一定里程的碾压混凝土和复合式混凝土路面。目前，碾压混凝土及复合式混凝土道（路）面的设计方法、施工工艺已日趋成熟，交通部已将这两种路面纳入《公路水泥混凝土路面设计规范》（JTJ 012—94）。由于机场水泥混凝土道面的面层较公路水泥混凝土路面面层通常要厚，因而更有条件采用复合式水泥混凝土道面。笔者认为目前已有必要在民航机场道面中试验和采用这一新技术。

1.2 水泥混凝土道面的设计理论和方法

水泥混凝土板承受使用荷载引起的反复应力作用，以及自然界温度变化和湿度变化引起的应力作用，并因此而发生断裂破坏。自本世纪初水泥混凝土道（路）面开始广泛使用以来，混凝土板的应力计算方法一直是人们关注的研究课题。目前，机场水泥混凝土道面设计所依据的理论，主要是弹性地基板理论。威斯特卡德（H. M. Westergaard）于1925年最先运用温克勒（Winkler）地基上无限大和半无限大弹性薄板模式，推导了单个车轮圆形均布荷载作用在混凝土板中、板边和板角所引起的荷载应力计算公式。之后，经过多次试验修证和理论上的不断完善，威氏荷载应力计算公式在道（路）面设计中得到了广泛应用。威斯特卡德还于1927年提出了混凝土路（道）面温度应力的分析方法。为了解决复杂分布荷载（如多轮组合、不规则轮印形状等）作用下的应力计算问题，纽马克（N. W. Newmark）于1942年根据威氏方法的基本原理最先提出用影响图计算弹性地基板应力及挠度的方法。皮克特和雷（G. Pickett, G. K. Ray）于1951年根据纽马克影响图的基本原理，绘制了刚性道面在不同荷载条件下弯矩和挠度的影响图。之后，美国波特兰水泥协会（PCA）帕卡德（R. G. Packard）等人，于1967年编制计算机程序，精确计算了荷载引起的的影响图，计算结果与皮克特—雷的影响图没有明显差别，误差在1.2%左右。皮克特—雷的影响图在许多国家（包括我国）的机场水泥混凝土道面设计中都得到了应用。60年代以来，随着电子计算机的广泛应用，各种有限元分析方法被用于混凝土道面的应力分析，使混凝土板应力计算的研究达到了一个新的阶段。有限元分析法研究工作的深入，使得过去无法解决的许多工程设计计算问题逐步得到解决。自70年代以来，我国对采用有限元法计算混凝土板应力开展了广泛的研究。目前，我国公路、城市道路和军用机场的有关设计规范都是以有限元法为基础的。

《规范》中板厚设计的理论和方法为：素混凝土板的荷载应力，按温克勒地基上的弹性薄板理论，以板边弯矩影响图计算得出的板自由边应力的0.75倍确定。水泥混凝土道面所需的厚度，新道面按荷载应力不超过混凝土弯拉疲劳强度确定；旧道面上的加铺层厚度按美国工程兵团的半经验公式确定。

关于设计理论和方法,在《规范》编制和讨论过程中,围绕着以下几个方面曾有一定的争议:

1. 地基模型的采用

目前,在弹性地基板理论中,为建立地基顶面挠度同反力之间的关系,主要有两种不同的地基假说:一种是以地基反应模量 k 表征的温克勒地基(又称稠密液体地基)假说(以下简称 k 地基假说)——地基上任一点的反力同该点的挠度成正比,而与其他点无关;另一种是以弹性模量 E 和泊松比 ν 表征的弹性半空间地基假说(以下简称 E 地基假说),按照这一假说,地基顶面任一点的挠度不仅同该点的压力,也同其顶面其他点上的压力有关。目前,欧美及日本的水泥混凝土道(路)面设计均采用 k 地基假说,而我国公路、城市道路和军用机场的水泥混凝土路(道)面设计则采用 E 地基假说。

有人倾向于在《规范》中采用 E 地基模型,认为:

(1) k 地基假说不如 E 地基假说符合地基的实际工作状况,且 k 地基假说无法对经过基层加强的层状地基作出恰当的判断;

(2) 采用 E 地基假说便于分享公路、城市道路及空军部门的科研成果,以及进行彼此间的技术交流;

(3) E 地基的刚度指标 E 值较易实测。

k 地基模型忽略了土基颗粒间的横向联系,而 E 地基模型则假设土体是各向同性的弹性体,强调了土基颗粒间的横向联系。一些试验表明,按变形曲线和支承反力分布两项指标进行理论计算和实测资料的对比, E 地基模型更符合实际情况^[6],说明 E 地基模型有其合理的方面。然而,笔者以及《规范》编写组的其他成员则倾向于采用 k 地基模型,这一观点得到了民航大多数专家的认可,并在《规范》中得到采纳。笔者认为,采用 k 地基模型有如下理由:

(1) 以 k 地基模型为基础的计算方法在世界上应用很广,大量的试验验证和工程实践的检验证明这一模型能够满足工程计算的需要(计算结果略偏于安全)^{[7][8]}。

(2) 采用 E 地基假说, E 值的确定一直没有得到妥善的解决^[9]。在采用 E 地基模型时,基层顶面的计算回弹模量 E_{tc} 并不能直接采用柔性路面设计所用的承载板实测结果 E_t (基层顶面当量回弹模量)。 E_{tc} 是个条件参数,影响因素很多,如荷载作用方式的变化(大小、面积、分布、作用位置)、混凝土板厚度的增减以及土基和基层的不同组合(相同 E_t 值情况下)都可能影响 E_{tc} 值的大小。《公路水泥混凝土路面设计规范》(JTJ 012—94)采用的 $E_{tc}=nE_t$ 形式的换算公式是通过试验实测反算的经验公式。其中, n 值在计算板中、板边荷载应力以及温度应力时取值均不相同,计算板边荷载应力时的 n 值是计算板中荷载应力时 n 值的0.75倍,计算温度应力时 n 值为常数0.35。按照该规范板边受荷时的 n 值计算公式: $n=1.718 \times 10^{-3} (h/E_t E_t)^{0.8}$,则 E_{tc} 与 $h^{0.8}$ (h 为混凝土板厚)成正比,而与 $E_t^{0.2}$ 成正比。说明 E_t 值的变化对 E_{tc} 值的影响不敏感,而 h 值的变化对 E_{tc} 值影响较大。另外,有人研究指出,刚性道面下土基回弹模量和基层回弹模量的提高倍数(与柔性路面下土基和基层的回弹模量相比)是不相同的,其中土基的回弹模量的提高倍数更大(由于土基与基层相比更具有非线性的应力—应变特征)^[8]。这说明笼统按 E_t 值修正得到 E_{tc} 值可能不尽合理。以上分析说明,采用 E 地基模型很难找到简明、一致而又在理论上得到圆满解释的确定 E_{tc} 值的方法。而国外在采用 k 地基模型时,并不需要按板厚、荷载大小和作用位置的不同以及为计

算温度应力的目的，而采用不同的 k 值。仅此而论， E_{tc} 值的确定不仅烦琐，而且也令人对其假设的合理性产生疑问。

(3) 实际地基的工作状况是复杂的，两种地基假说都不能完全符合实际。 k 地基假说低估了地基间的横向联系，而 E 地基假说则过分强调了这种联系。另外，土基实际上还存在着不同于这两种假说的非线性的应力—应变关系。两种地基模型都是为了解题方便而作出的理论假设。事实上， E 地基假设的计算结果并没有被试验证明更完全符合实际。国内曾做过试验，在角隅作用荷载时，将实测的挠度及应变曲线与弹性半空间地基板的有限元解算的理论曲线相对比，无法通过调整地基的回弹模量取得与实测曲线相吻合的结果，而改用温克勒地基板有限元解，则理论与实测值基本吻合，说明在板角受荷时 k 地基模型比 E 地基模型计算结果更符合实际^{[6][8][20]}。

(4) 前苏联过去曾采用 E 地基模型，后来经过广泛实地调查发现地基沉陷的实际发布情况与 E 地基假说并不相符（季节性冰冻地区，春融期间的粘性土壤更接近于温克勒地基假说），因此于 1960 年在其《机场道面设计技术规范》(CH120—60) 以及 1976 年社会主义国家铁路合作组织公布的刚性路面设计方法中，均改用 k 地基模型^[8]。

(5) 使用 k 地基模型在进行力学理论分析时更简便。

(6) 据了解，当初公路部门决定采用 E 地基模型，主要是为了与柔性路面设计取得一致，并利用柔性路面设计中已有的实测资料。道路界的一些专家也认为刚性道（路）面设计中采用 k 地基模型是合理可行的。

(7) 国外民用机场混凝土道面设计基本上是以 k 地基模型为基础的，且我国民航过去一直按西方的计算方法采用 k 地基模型。另外，《国际民用航空公约附件十四——机场》以及我国《民用航空运输机场飞行区技术标准》(MHJ 1—85) 都要求报告道面强度 PCN 值以及土基强度等级，其刚性道面的土基强度等级是以 k 值划分的，而 PCN 值的计算通常也使用 k 地基模型。因此，使用 k 地基模型更便于与国内过去的设计成果及国外通行的设计方法相比较，从而使设计更为安全可靠；更符合国际习惯和便于资料、信息的交流，由于民航的行业特点，这一点也很重要。

2. 临界荷位的选择

在民航以往的水泥混凝土道面设计中，基本上是按荷载位于板的中部产生的应力（采用温克勒地基上无限大板的板中弯矩影响图进行计算）作为混凝土板厚计算的依据。在《规范》征求意见过程中，一些民航的专家主张沿袭板中受荷计算模式。他们认为，民航多年来采用板中应力计算板厚，设计出的道面使用情况基本良好，而担心采用板边应力计算板厚，混凝土板厚度会增加太多，一方面造成浪费，另一方面使新旧设计板厚显得差距过大。《规范》编写组认为采用板边临界荷位更合理，因为：

(1) 试验验证和长期的使用经验表明，几乎所有的荷载引起的裂缝都是从板的边缘开始并向板中部发展的。采用应力计算结果较大的板边临界荷位不仅理论上更合理，而且符合道面的实际工作状况。正是基于这一点，美国联邦航空局 (FAA) 的设计方法从 1978 年开始将临界荷位由板中改为板边。我国公路、城市道路和军用机场的有关设计规范也都采用板边临界荷位。

(2) 接缝是板的薄弱部位，即使设置各种传荷装置也难以达到接近 100% 的传荷效能，况且大量设置复杂的传荷装置（如传力杆）一方面不一定经济，另一方面施工也很难达到

设计要求。在此情况下,采用板中受荷进行计算在理论上不合理。

(3) 民航以往采用板中应力计算板厚没有出现明显的问题,原因是多方面的。主要是过去设计中采用的安全系数一般较大。同时,以前大多数机场飞机运行量都不大,机型也较小,一方面混凝土板的疲劳消耗少,另一方面板缝的传荷能力下降不多(因板缝传荷能力随荷载重复作用次数增加而下降)。这使得根据板中应力进行设计所存在的问题没有得到充分暴露。但是,随着民航许多机场运行量的迅速增加,继续采用板中临界荷位是不安全的。

(4) 按照板边临界荷位进行设计,由于《规范》采用按机轮重复作用次数计算疲劳应力作为比较依据,对于许多运行量不非常大的机场板厚比过去的设计增加很少(因为过去的计算采用了较大的安全系数),而对于运行量很大的大型机场,厚度有所增加(最多可达3~4cm)也是必要的。

3. 计算方法的确定

有限元法是一种近似计算方法,该方法将一个固体连续介质分割成若干有限的离散元素,各个元素通过结点联系起来组成集合体。自50年代以来,随着计算机在工程实践中的广泛应用,有限元法在航天工程、机械工程和土木工程等方面得到了应用和推广。有限元法用于刚性道(路)面应力分析始于1965年,张佑启和森克维琦(Zienklwicz, O.C)提出了弹性地基上板体的有限元分析方法。之后,人们对刚性道(路)面的有限元分析法的研究不断深入、完善,使有限元分析更符合实际,从而在工程设计中得到了应用。例如,PCA于1984年公布的《公路与城市道路水泥混凝土路面厚度设计》采用有限元计算方法作为理论依据,除了板内应力(疲劳指标)外,还考虑了板角挠度的验算(冲刷指标)。在国内,中山大学力学教研室于1976年最先将有限元位移法应用于刚性道面的力学分析,解决了温克勒地基上九块铰接板的飞机轮载应力计算。之后,我国道路和机场研究人员对有限元法进行了广泛、深入和系统的理论研究,并且通过试验验证,证明了这些方法的可靠和实用意义。这些研究成果已成为公路、城市道路和军用机场有关设计规范的基础。

采用有限元法对刚性道面进行应力分析,与以解析法为基础的应力分析方法相比,具有如下优点:

(1) 可以按板块的实际大小求解有限尺寸的道面板,从而消除无限大板或半无限大板假设所带来的误差;

(2) 可以考虑各种荷载情况(包括荷载的组合和荷载的位置),因此可以求得符合荷载实际情况的应力分析;

(3) 可以根据板的实际边界条件进行计算,如接缝的传荷能力、板和地基的脱空(不紧密接触)等;

(4) 用有限元法求得的是整个板面的应力场和位移场,从而可以更全面地分析板的受力状况。

笔者曾主张采用有限元分析法作为《规范》荷载应力计算的基础,放弃计算理论较为落后的影响图法。但是,参与对此进行讨论的大多数人认为民航现阶段采用有限元法还不成熟:

(1) 民航学习和掌握有限元法还需要一定的时间;

(2) 设计人员目前对用影响图计算已经非常熟悉;

(3) 影响图本身的可靠性已经历了长时间的实践检验。

1.3 水泥混凝土道面的使用要求和设计任务

机场道面要供预定使用的飞机能够安全、快速、舒适地起降、滑行或停放。水泥混凝土道面在使用过程中承受机轮荷载、机场专用车辆荷载、飞机产生的高温高速喷气流,以及自然界冷热、干湿、冻融等因素的作用。为了保证飞机在任何气候条件下都能正常使用,水泥混凝土道面应具有良好的性能,主要包括以下几个方面:

1. 足够的强度和刚度 道面在使用过程中承受着使用荷载及各种自然因素的作用,如果道面结构的整体或其中某一组成部分的强度不足,道面便会破坏。道面结构还应具有足够的抗变形能力,即刚度。水泥混凝土道面的某些破坏,便是由于基层或土基刚度不足,产生过大的累计塑性变形,引起板底脱空造成的。

2. 良好的气候稳定性 道面袒露于自然环境中,在水分和温度的影响下,其强度和刚度以及其他使用品质会随着气候条件的变化而发生波动或下降。例如,水泥混凝土道面在水的作用下有可能出现接缝唧泥或板底脱空,进而造成板的断裂。在季节性冰冻地区,由于土基的不均匀冻胀,也会引起水泥混凝土道面的破坏或不平整。在严寒地区,道面混凝土如抗冻性能不好会冻坏。

3. 表面平整 飞机在不平整的道面上滑行会产生附加的振动作用。这不仅造成飞机颠簸,影响其平稳,而且这种振动作用会反过来对道面施加冲击力,从而加速道面的损坏。同时,道面的不平整还会加速飞机部件的磨损和疲劳,危及飞行安全。除铺筑混凝土时施工质量不佳引起的表面不平整外,水泥混凝土道面在使用中如出现接缝错台、边角断裂、表面剥落等也会形成道面不平整。因此,必须通过可靠的设计、优质的施工以及经常和及时的维护,保证道面的平整。

4. 表面抗滑 水泥混凝土道面必须具有粗糙的表面,以提供良好的抗滑性能。光滑的表面会导致飞机着陆时制动距离过长,尤其在湿跑道上快速滑行时,飞机容易产生水上飘滑而失去控制。国内外发生的飞机冲出跑道的事故,许多是由于跑道粗糙度不符合要求引起的。水泥混凝土道面的表面粗糙度,可以通过施工时采用拉毛(槽)、压槽和刻槽等方法来实现。

5. 耐久性 道面在其使用年限内,受轮载和气候因素长期、反复的作用,其结构整体或某一组成部分会逐渐出现疲劳损坏和塑性变形累积。因此,道面设计必须保证道面结构在其使用年限内保持较高的抗疲劳和抗塑性变形能力,即耐久性。

水泥混凝土道面的设计任务就在于提供经济的道面结构,使其能在预定的使用年限内承受使用荷载和环境因素的作用,而具有符合上述使用要求的性能。同时,设计出的道面结构应符合当地所能提供的资金、材料、施工技术和维护等条件。

机场水泥混凝土道面结构设计主要包括以下内容:

1. 结构层组合设计 根据机场使用飞机的特性及运行量、当地气候条件、地质和水文情况以及材料供应情况等,选择和设计道面的结构层次。

2. 混凝土板厚设计 按设计规范的要求,确定满足设计使用年限内使用要求所需的混

凝土板厚度（含混凝土加铺层的情况）。

3. 分块设计和接缝设计 布置各类接缝的位置，设计接缝构造，选择接缝材料。

4. 配筋设计 在板较长、板的形状不规则、板中设有各种设施、地基有可能出现不均匀沉降以及道面下埋有构筑物时，配置钢筋以阻止可能出现的裂缝张开。

5. 道肩设计 选择道肩类型和结构层次，确定各层的材料和厚度。

机场水泥混凝土道面结构设计的步骤大致如下：

1. 采集数据 包括：荷载运行（使用机型、各种机型年运行量等）、环境条件（气温、冰冻深度等）、材料（料场分布、材料品质和供应、运输条件等）、地质和水文（土质、地下水、土基反应模量等）、经济（概预算定额、价格等）、当地道（路）面使用经验等。进行混凝土加铺层设计时，还应调查和收集现有道面使用状况的数据。

2. 初拟道面结构方案 包括结构层组合、材料组成和各结构层大致厚度。

3. 材料组成设计和试验

4. 确定设计参数 包括设计使用年限、设计飞机及其累计作用次数、土基及基层顶面反应模量、混凝土设计强度和弯拉回弹模量等。

5. 进行结构计算 根据所拟的道面结构方案计算混凝土板的厚度。

6. 进行各方案的费用分析

7. 综合各方面的因素，确定最终设计方案

8. 根据各设计阶段的深度要求，进行各项具体设计

《规范》对水泥混凝土道面设计的各项内容作了要求。但是，它不能取代设计人员的理论修养、工程经验以及敬业精神。由于各地、各机场具体情况的复杂性，加之水泥混凝土道面技术的不断发展，设计人员应该力求弄清《规范》的本质含义，对其正确而又灵活地进行运用，同时要广泛、认真地学习、吸收、总结和借鉴国内外新的技术和经验。在道面设计中切忌盲目地照搬、照套过去的或其他机场的设计模式。

第二章 设计参数

2.1 设计荷载

《规范》中规定了确定设计飞机的原则和计算设计飞机主起落架轮载的方法，即：在预计使用的飞机中，应以对道面混凝土板厚度要求最大的飞机作为设计飞机。设计飞机主起落架上的轮载按下式计算：

$$P_s = \frac{Gp}{n_c n_w}$$

同一机场不同部位的道面分别设计道面厚度时，应分别选择设计飞机，对此《规范》条文说明已作了较详细的解释，在此不再赘述。《规范》中要求采用“对道面混凝土板厚度要求最大的飞机”作为设计飞机，这是因为：目前还没有找到精确换算不同飞机疲劳作用次数的换算公式，采用对道面混凝土板厚度要求最大的飞机作为设计飞机可以使计算结果更安全可靠（较轻飞机对道面的疲劳消耗一般很少）。在《规范》中采用了“设计飞机”而不是“设计机型”这一概念，因为对于机场不同部位的道面，同一机型可能需要选择不同的重量（滑行重量、起飞重量、着陆重量、空机重量+燃油重量，等等）作为计算的依据。

《规范》中确定设计飞机主起落架上的轮载的计算式隐含着以下假定：

- (1) 设计飞机的每个主起落架具有相同的轮子数 (n_w)，并承受相同的重量；
- (2) 飞机轮载对道面的作用等于其静载。

对于这两个假定下面分别进行讨论：

1. 大多数机型的主起落架具有相同的轮子数，但对某些特殊机型，如 MD-11、DC-10 等，这一点并不成立。当选用这些机型中的某一飞机作设计飞机时，应根据飞机资料上各个主起落架上的荷载分配比例确定其各个起落架上的轮载。当然，根据目前国内使用机型，一般不需要这样做。例如，在可供 MD-11、DC-10 使用的机场，通常可选用 B747-400 型飞机作为设计飞机（后者对道面混凝土板厚度要求更大）。

即使每个主起落架轮子数相同，当飞机处于某些行驶状态时，各个主起落架承受的重量也会不同。例如，当飞机在弯道上滑行且弯道外侧没有超高时，由于离心力的作用，靠弯道外侧的主起落架需要承受更大的重量。由于在确定飞机转弯半径的设计中，通常已经考虑了对离心力的限制，且设计良好的弯道在其外侧可以提供部分超高，因此在道面设计中一般不考虑这种弯道处一侧主起落架的超载。有人也曾建议：在弯道处对混凝土板进行加筋。但是加筋只能控制而不能避免混凝土板的开裂，如果需要对弯道处予以加强，更适当和经济的措施是增加混凝土板的厚度。

2. 飞机在道面上起飞、着陆、滑行和试车时，会对道面产生不同于其静载的动态效应：飞机的振动会对道面产生大于其静载的冲击作用；由于运动着的飞机对道面施荷的瞬时性，道面对其受荷的响应（如挠度、应变、应力）比静载作用时要小，这相当于作用力减小；飞机以一定速度滑跑时，机翼升力会使机轮对道面的压力减小。

根据美国工程兵团 Waterways 试验中心的试验结果,水泥混凝土道面在飞机正常滑跑时的动载系数(动载实测值/静载实测值)最大值为 1.1。我国空军部门曾于 1987 年在武功机场进行试验,实测轰 6 飞机在不同速度下滑跑时水泥混凝土道面的挠度变化情况,结果表明当飞机滑行速度约 20km/h 时,其动载系数最高,达 1.19^[12]。前苏联的研究人员对飞机机轮通过道面表面 20mm 台阶和鼓包不平整处产生的动力值作过测定,发现:当飞机运动速度为 30~50km/h,通过高 20mm 台阶时动载最大,动载系数达 1.25;而在速度为 60~70km/h 时,通过同样高度的鼓包,动载系数仅为 1.08~1.10^[33]。

在机坪、滑行道和跑道端部,飞机滑行速度慢,此时机翼产生的升力很小,而飞机的振动(由道面的不平整引起)会对道面产生不利的冲击作用。因此,这些部位的道面受力条件有可能较静载作用时不利。在跑道中部,飞机起飞时速度较高,此时机翼升力较大,抵消飞机的一部分重量,同时高速滑跑的飞机对道面某一点的作用时间很短暂,使道面变形减小。因此,跑道中部受力条件往往比飞机静载作用时还要有利。

《军用机场水泥混凝土道面设计规范》(GJB 1278-91)中的设计荷载是按动载考虑的,其采用的动载系数为:跑道端部、滑行道、联络道和停机坪,当设计飞机胎压 $q \geq 1.08\text{MPa}$ 时,取 1.25; $q < 1.08\text{MPa}$ 时,取 1.20。跑道中部取 1.0(兼作滑行道时,按滑行道取值)。

国外民用机场水泥混凝土道面设计一般不考虑飞机动载的影响。

道面对飞机的动荷响应是较为复杂的问题。目前国内外的理论研究还很不完善,试验资料较少且不系统。《规范》中没有考虑飞机的动载效应,主要是考虑到:

(1) 在确定设计飞机重量时,一般都选用了道面可能受到的最大静载重量(如站坪、平行滑行道按最大滑行重量设计),由于飞机满载、满油的情况并不多,因此设计荷载已经留有少量安全因素;

(2) 根据国内外已有的试验结果,有理由相信在正常情况下(道面平整度符合要求)飞机产生的动载效应并不严重;

(3) 《规范》中按照由室内小梁加速荷载试验确定的疲劳方程来考虑飞机的重复作用,由于混凝土在长期使用过程中强度会有一定增长,这也给设计增加了安全性。按《规范》中采用的疲劳方程计算,重复作用 5 000 次时,设计弯拉强度与混凝土疲劳应力之比为 1.534;而在 FAA 的刚性道面设计方法中,5 000 次重复作用次数时混凝土容许应力按混凝土的抗弯拉强度除以 1.3 确定。可见《规范》比 FAA 的方法要保守一些;

(4) 《规范》采用板边临界荷位设计板厚,比以往按板中受荷计算时混凝土板厚度要有所增加,如设计荷载再乘以较大的动荷系数,则厚度增加较多,这会使设计人员、建设单位和设计审批部门都难以接受。

对于受力条件较好的跑道中部,在设有平行滑行道时,《规范》规定其混凝土板厚度可采用跑道端部混凝土板厚度的 0.9 倍。

2.2 设计使用年限

FAA 的刚性道面设计图表是按设计使用年限 20 年制订的。日本机场水泥混凝土道面的设计使用年限一般采用 10 年,法国采用 10~20 年。我国军用机场根据不同机场等级采用 20~40 年的设计使用年限。

根据水泥混凝土材料的耐久性以及耐疲劳特性,采用较长的设计使用年限在经济上往往是合理的。例如,按《规范》采用的混凝土疲劳方程,累计作用次数增加一倍,则混凝土弯拉疲劳强度下降 1.9%,所需混凝土板厚度只增加不到 1.5%。考虑到采用较短设计使用年限带来的改建费用以及可能产生的影响机场正常运行的费用,则增加很少的初期投资而显著延长道面使用年限是合算的。但是,由于对长期飞机运行量(包括飞机组合、运行架次)很难作出准确的预测,更主要的是由于使用机型可能发生较大变化,又不宜使用太长的设计使用年限。因为,如果采用很长的设计使用年限,但没有考虑将来采用较大型飞机,一旦启用较大型飞机,道面混凝土板厚度仍不足;而提前很长时间考虑机型发展,则可能要使混凝土板厚度增加很多,经济上又不合理(且不论这种对机型发展的估计存在很多不确定性)。正是由于考虑到飞机机型的发展变化,所以国外水泥混凝土道面的设计使用年限都较短。

综合考虑上述两方面的原因,同时结合我国民用机场水泥混凝土道面实际使用年限的分析,《规范》对不同飞行区等级的机场分别规定了 20 年(飞行区等级指标Ⅱ为 A、B、C)和 30 年(飞行区等级指标Ⅱ为 D、E)的设计使用年限。同时《规范》规定,设计使用年限“也可按特定使用要求确定”,以留有一定的灵活性,供设计人员根据机场建设资金情况、对使用机型变化的预测等因素作出可能更合理的选择。

需要说明的是,道面的设计使用年限并不等同于道面的实际使用寿命。由于设计理论、道面材料性能、土基特性、使用荷载等存在的偏差,要对道面使用寿命作出准确预测是困难的。最新的道面可靠性设计理论试图依据道面在设计使用年限未达到某一损坏标准时的概率,来进行道面结构设计,目前这一理论尚未达到在工程设计中推广运用的程度。

2.3 年运行次数换算

《规范》中将各种飞机的年运行次数换算成当量设计飞机年运行次数的方法,系采用了美国联邦航空局的换算方法^[3]。我国军用机场水泥混凝土道面设计亦采用这一换算方法^[11]。

《规范》以混凝土板在机轮荷载重复应力作用下的疲劳破坏作为设计标准。当道面供多种飞机使用时,不同飞机对道面的疲劳消耗是不同的。对此,一般有两种计算方法:一种是根据等效疲劳的概念,把多种飞机的疲劳次数换算成设计飞机的当量疲劳次数;另一种方法是单独计算各种飞机的疲劳消耗,然后应用 Miner 定律进行累加(将每种飞机荷载的计算应力代入疲劳方程,可得到其达到疲劳破坏时所允许的重复作用次数。每种飞机荷载在设计使用年限内的实际作用次数同其允许重复作用次数的比值,即为该飞机荷载对混凝土抗疲劳能力的消耗比例。各种飞机疲劳消耗比例相加,如等于或接近 1,表明所选混凝土板厚度合适)。PCA 即采用了第二种方法,避开了不同飞机运行次数的换算^[7]。

笔者曾撰文指出:FAA 的换算公式在理论上有缺陷,不能实现不同荷载的等效疲劳换算^[17]。该文的分析、计算和比较表明,FAA 的换算公式存在以下缺陷:

(1) 由于 FAA 换算公式采用了运行次数对数之比为定值的形式,使换算不具有线性叠加的性质,这与 Miner 定律不符,并会引起一些逻辑上的矛盾。简单的计算表明,采用 FAA 的方法进行换算,某一飞机换算成设计飞机的当量次数并不随其运行次数的增加而成比例

(线性)增加。而且不能在不同飞机之间任意换算,选用不同的设计飞机,换算结果会不一样;

(2) FAA 换算方法中对不同起落架构形飞机的换算,仅考虑了轮子数量不同所造成的重复作用次数的不同,而忽视了轮子数量较多时在道面中可能产生较大应力这一重要差别,从而会得出极不合理的结果;

(3) 采用 FAA 的方法进行换算,与按 Miner 定律累加各种飞机的疲劳消耗的方法相比,所得换算结果可能相差较大。

因此,笔者在该文中建议,“分别考虑主要飞机对道面的疲劳消耗然后累加,而不必采用将各种飞机换算成某一设计飞机的方法。”

FAA 的换算方法不能实现不同飞机的等效疲劳换算,所得换算结果可能有很大的偏差,但是《规范》采用这一换算方法对于混凝土板厚计算却不会得出明显错误的结果,因为:

(1) 由于累计作用次数对混凝土板厚的影响不敏感,即使总的换算结果相差一倍,板厚相差也不超过 1cm;

(2) 当采用对道面混凝土板厚度要求最大的飞机作设计飞机时,换算结果是偏于保守的 (FAA 换算公式缩小了不同飞机间的差别);

(3) 由于设计飞机本身的运行次数占换算出的当量运行次数相当的比例,因此换算结果不太可能有数倍 (2 倍以上) 的误差。

采用 FAA 换算方法对最终混凝土板厚计算结果影响不大,但这不能视为 FAA 换算方法本身的优点。

日本、前苏联、法国等也有各自不同的、用以将非设计飞机运行次数换算为当量设计飞机运行次数的方法。日本的换算方法与 FAA 的换算方法相比,所用公式形式相似,但用当量单轮荷载取代飞机主起落架轮载 (就板中应力计算而言,这样处理对于不同起落架构形之间的换算较为合理),另外其换算方法直接得出设计使用年限内的当量设计飞机 (累计) 重复作用次数,公式所用的一些系数也与 FAA 方法有所不同。前苏联按下式将各种机型飞机年运行次数换算为计算机型 (即设计飞机) 的年运行次数^[33]:

$$N_s = \sum_{i=1}^n N_i S_i$$

式中 N_i —— 拟换算飞机的年运行次数;
 N_s —— 当量设计飞机年运行次数;
 S_i —— 换算系数,根据拟换算飞机机轮荷载 P_i 与设计飞机机轮荷载 P_s 的比值确定,见表 1。

表 1 换算系数 S_i

P_i/P_s	1	0.95	0.90	0.85	0.80	0.75	<0.70
S_i	1	0.55	0.35	0.25	0.15	0.08	0.03

比较和验算可知,前苏联的这一换算方法有比 FAA 换算方法更合理的方面,但其对不