

ACI 325.7R-88

Recommendations for Designing Prestressed
Concrete pavements

预应力混凝土路面设计指南

——美国预应力协会技术委员会325技术报告

范跃武 译

张圣城 校审



international®

同济大学出版社

预应力混凝土路面设计指南

——美国预应力协会
技术委员会 325 技术报告

范跃武 译
张圣城 校审

同济大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

预应力混凝土路面设计指南/(美)ACI Committee 325;
范跃武译. —上海:同济大学出版社,2000.3
ISBN 7-5608-2128-6

I. 预… II. 范… III. 预应力混凝土-
路面-设计-指南 IV. U416.216.02-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 57728 号

预应力混凝土路面设计指南

范跃武 译 张圣城 校审

同济大学出版社出版发行

(上海市四平路 1239 号 邮编:200092)

全国新华书店经销

同济大学印刷厂印刷

开本:787×1092 1/32 印张:2 字数:48 千字

2000 年 3 月第 1 版 2000 年 3 月第 1 次印刷

印数:1—5000 定价:2.00 元

ISBN 7-5608-2128-6/U·26

美国预应力混凝土协会 325 委员会技术报告

混凝土路面的承载能力通过施加预应力可以大大提高,预应力在路面板中产生压应力,这些压应力使路面板构件的受力特性得到改善,从而大大提高受弯变形的能力而不会出现裂缝。

如果对伸缩缝的设计和普通钢筋的布置予以足够的考虑,就可以实际修建厚度比普通钢筋混凝土路面大大减薄而不会出现裂缝的长预应力混凝土路面板;并且考虑到混凝土路面板沿横截面由顶面到底面温度差异的影响所产生的应力的有效分布,需要施加的预应力的的大小和相应的预应力钢筋的数量可以减少。

本报告分析了影响预应力混凝土路面设计的各种因素,并推荐了设计和结构计算所采用的方法。

目 录

第一章 预应力混凝土路面·····	(1)
1.1 简介·····	(1)
1.2 定义·····	(3)
1.3 预应力混凝土路面的承载能力·····	(5)
1.4 历史背景·····	(7)
第二章 预应力混凝土路面与时间有关的变形 和约束应力·····	(10)
2.1 预应力路面板的季节性长度变化·····	(10)
2.2 不同路面每年的温度-长度周期性变化 ——举例说明·····	(11)
2.3 由于收缩和预应力加徐变引起的非周期性 长度变化·····	(14)
2.4 均匀分布的约束力·····	(17)
2.5 沿路面厚度对变形梯度的弯曲约束力·····	(19)
2.6 翘曲变形和约束力·····	(20)
2.7 在路面横截面上的预应力分布·····	(21)
第三章 后张法预应力混凝土路面·····	(25)
3.1 简介·····	(25)
3.2 双缝构造·····	(26)

3.3	单缝构造	(28)
3.4	施加预应力	(30)
3.5	连接缝宽度及细部构造	(31)
第四章	临界应力组合	(34)
4.1	预应力混凝土路面的车辆荷载应力	(34)
4.2	临界汽车荷载作用位置	(35)
4.3	临界组合的环境应力	(35)
4.4	路面厚度	(39)
4.5	公路车辆荷载应力	(40)
4.6	机场交通荷载应力	(40)
4.7	预应力混凝土路面的允许组合应力	(42)
第五章	预应力混凝土路面设计	(43)
5.1	设计步骤	(43)
5.2	公路设计实例	(45)
5.3	机场路面设计实例	(47)
5.4	利用图表设计法	(49)
第六章	小结和需要进一步研究的问题	(52)
6.1	小结	(52)
6.2	对进一步研究的建议	(52)
第七章	推荐的参考文献	(53)

第一章 预应力混凝土路面

1.1 简介

人们很早就认识到,横向接缝是素混凝土路面和配筋较少的钢筋混凝土路面结构缺陷的根源,混凝土路面的许多问题,诸如断裂、错台、唧泥和剥落常常发生在裂缝处,反过来又影响路面的行车质量。此外,对接缝还需要做大量的养护工作,而路面的养护工作不仅花费大而且常常中断交通。解决路面接缝问题的一种方法是除了在路面的两端设置横缝外,中间不设置路面接缝,这就是连续钢筋混凝土路面的方法(CRCP);另外一种方法是采用间隔距离很长的横向接缝,这种方法就是预应力混凝土路面方法。

连续钢筋混凝土路面一般允许出现横向裂缝,尽管在这种路面结构中配有大量的纵向钢筋使这些横向裂缝挨得很紧,但随着时间的推移,如果在裂缝宽度发展到比较宽的情况下,仍会出现破碎,有时甚至出现错台,并因此会影响路面行车的舒适性。

采用合理的方法设计和施工的预应力混凝土路面,可以采用很少的横向接缝达到表面平整和消除裂缝的要求。尽管预应力混凝土路面有这些优点,但是在美国尚未得到广泛应用,主要是由于以下原因:

(1) 熟悉预应力混凝土路面设计和施工的路面工程师不多。

(2) 由于在美国仅修建了少量的预应力混凝土路面,资料缺乏,对这种路面结构在各种荷载和环境条件下的工作性能未进行过必要的评价。

(3) 过去采用的预应力混凝土路面的纵向和横向两个方向施加的预应力较大,使得路面造价较高,尽管和非预应力混凝土路面相比可以使路面厚度减薄和后期养护费用降低,但其经济性未充分显示出来,也使得混凝土路面的广泛应用受到限制。

(4) 预应力混凝土路面一旦出现裂缝修复非常困难,预应力混凝土路面的修复在 Morris 和 Emery(1977)的一篇文章中有详细介绍。

(5) 还有一些工程师担心对钢绞线和接缝可能有腐蚀,本文对抗腐蚀的问题不作讨论。抗腐蚀的技术措施在修建桥面板和停车库等方法指南中均有叙述,可参见美国混凝土协会 201,221,345 委员会的技术文件。

如果对以下两条重要因素给予适当的考虑,预应力的的大小和相应的预应力钢筋的数量与以往采用的相比,就可以大大地减少:

(1) 采用摩擦力小的介质或对路面和下承层材料的接触面进行处理,可以使温度下降时由于混凝土板收缩产生的摩擦力引起的拉应力减少。由于摩擦力的减小,使得需要施加的预应力也相应地降低。

(2) 考虑到由于板底面和顶面(不包括板边处)的湿度差异产生的收缩应力沿混凝土板厚的有利分布情况,可以抵消一部分汽车荷载引起的应力,这些收缩应力的残余应力在板底部为压应力,可以抵消由汽车荷载产生的很大一部分拉应

力,因而可以减少需要的预应力钢筋的数量。

由此,本篇报告的目的就是为设计比较经济的预应力混凝土路面提供一些指导性的意见。其中有一章综述了设计经济的预应力混凝土路面采用的方法,并用两个实例说明了实际设计中怎样应用本报告介绍的资料和方法进行设计。

1.2 定 义

1.2.1 弯曲——初始形状为直线形或平面形的构件发生弯曲的变形,例如,混凝土板由于徐变、温度不同或邻接面范围内湿度的差异引起的翘曲变形。

1.2.2 挠度——结构或构件由于荷载或体积变化引起的位置或形状的改变,通常是由确定的平面按线性变形计量而不是按角度的变化计量(对于路面只是指板的垂直位移)。

1.2.3 变形——由应力引起的尺寸和形状的改变,与时间有关的变形也可能是非应力变形,例如,无约束条件下的收缩或温度引起的长度改变。

1.2.4 伸长和缩短——用来表示长度的改变。

1.2.5 摩擦约束——路面发生位移时,路基对路面的摩擦阻力引起的路面长度变化量的减小。对于较长的混凝土路面板,在基层上始终保持为平面,可以假定摩擦应变沿截面的顶面到底面为均匀分布,只有可以自由变位的板两端没有摩擦约束。

1.2.6 梯度——用来表示温度或湿度沿垂直方向由板顶面到板底面的变化,称为温度梯度和湿度梯度。

1.2.7 后张法——当混凝土硬化以后再张拉预应力钢束的一种预应力混凝土施工方法。

1.2.8 预应力混凝土——为满足受力要求,通过使内部产生一定大小和分布的内应力按所要求的程度来抵消在使用荷载作用下产生的拉应力的混凝土。采用钢筋的预应力混凝土一般是通过张拉钢筋施加预应力。

1.2.9 预应力混凝土路面板——为了减小使用形态下混凝土的拉应力,在施工中对混凝土截面施加一定压力的路面。

1.2.10 约束——指对新浇注混凝土和结硬以后的混凝土自由移动的限制(对于路面是指由温度和湿度引起的变形的减小,这是由于因位移引起的力产生与应力有关的应变的结果)。约束可能有内部的也可能有外部的,可以作用在一个方向或多个方向。

1.2.11 收缩——指由于干燥或化学变化引起的体积减小。它是时间的函数,但是与由温度和外荷载产生的应力无关。

1.2.12 应变——指材料受外荷载作用产生的变形或是由内部原因引起的长度和体积潜在变形的被约束部分。

1.2.13 长期弹性模量——该名词是指计入了包括瞬时弹性变形和徐变变形的弹性模量。

1.2.14 膨胀——指由于潮湿或化学变化,或者二者共同引起的体积增大。它是时间的函数,但是与由温度或由于外荷载引起的应力无关。

1.2.15 翘曲——指混凝土路面板与它的初始形状的偏差。通常是由板内部的温度和湿度差异或二者共同引起的(路面的翘曲影响是在零梯度温度下专门确定的)。

1.3 预应力混凝土路面的承载能力

美国混凝土学会 325 委员会曾经发表了两篇关于预应力混凝土路面的研究报告,其中 1959 年 2 月份的一篇报告,回顾了在此之前修建预应力混凝土路面的经验和所进行的试验,该报告发表以后,预应力混凝土路面比非预应力混凝土路面承载能力的大幅度提高引起了人们的广泛注意。1968 年 4 月的一份报告,对修建的试验性预应力公路项目进行了详细的介绍,包括对长路面板长度的变化和对位移的摩擦约束的计算方法等。

在这两篇报告发表以后,美国修建了几段预应力混凝土路面,对这些路面进行评价的结果证明先前的报告所提出的概念是正确的。对预应力混凝土路面的研究表明,在板中同一水平面上采用有效的预应力分布可使这些混凝土路面达到较高的承载能力(ACI325 委员会,1959)。

大多数计算混凝土路面应力的方法都是以 Westergard (1948)的理论方法和在 60 年代初期建立起来的美国各州公路工作者协会道路试验(AASHO Road Test)(1986)的结论为基础建立的,这两种方法都主要是确定承受轮载所需要的路面厚度,但是没有一种方法是直接考虑到由温度和湿度变化引起对位移或挠度的约束产生的应力,采用这些方法计算得出的设计厚度在大多数情况下都足以承受交通荷载,然而在常规的路面设计中,对如何防止路面开裂的问题却一直重视不够。

在 30 年代,美国公路局对混凝土路面进行了广泛的研究工作,并由 Teller 和 Sutherland 在 1935~1937 年间发表了五篇

论文公布其研究结果,这一研究包括了混凝土路面在土基上的各种受力特性,也涉及到了湿度和温度的影响,并且用来验证 Westergard 的理论结果。这些论文的作者认识到了由湿度引起的位移和约束力的普遍重要性并取得了一定的数值,但是没有提出定量的方法把这一概念结合到设计中去。

确定与时间有关的梯度约束应力和这些应力在路面横截面上的分布的定量方法,是从 1956~1958 年之间由设在 Rolla 的密苏里大学对预应力混凝土作为路面板的研究开始发展起来的,该项研究是由美国联邦公路管理局(FHWA)和密苏里州公路局共同赞助的(Friberg, 1962)。

该项研究所施加的预应力一直到 $500 \text{ lb/in}^2 (3.5 \text{ MPa})$,结果表明徐变变形在路面板的底部比顶部要小。这一结果可以用来确定缓慢变化的湿度翘曲约束,以及在预应力作用下早期及以后的变形情况,由于预应力和混凝土的不均匀收缩的共同作用在预应力混凝土路面底部产生压应力集中,这是预应力混凝土路面的重要特性。

这一发现使得设计人员除了考虑到抵抗交通荷载的预应力以外,并能够考虑到由温度和湿度梯度引起的环境应力的影响,这一点尤其符合预应力混凝土路面的内部受力情况,预应力混凝土路面一般都是由在薄膜层上浇筑的大面板组成的,当水分由这些路面板的顶面自由蒸发时,底面总是被路面板覆盖着并限制水分沿该表面移动。

考虑到这种有利的湿度分布情况,并对长路面板的接缝设计和钢筋布置予以适当注意,设计人员就可以设计出比非预应力混凝土路面的厚度大大减薄的预应力混凝土路面。

1.4 历史背景

1.4.1 1960 年以前的发展状况

从 1945 年世界大战的末期到 1960 年间,大约修建了 60 段预应力混凝土路面,其中大部分为试验路面段,总计公路路面大约有 13mile(21km),机场路面大约有 20mile(32km),这些路面修建为多种不同的宽度。其中有一条公路和六个机场的试验路面是在美国。

这些早期修建的工程采用的预应力方法多种多样,施加预应力的大小变化范围也很大。其单块板的长度大约为 160 ~ 700ft(50 ~ 210m),平均大约有 400ft(120m)。后张法路面的横缝和与桥台接缝处采用扁式千斤顶张拉预应力钢筋。试验将路面划分为一定的长度以使其板中的预应力可以随温度和湿度的变化发生季节性变化。对单块板施加的纵向预应力大小变化范围为 $190 \sim 700 \text{ lb/in}^2$ ($1.3 \sim 4.8 \text{ MPa}$) 以上。大约有 1/2 的公路和所有的机场路面采用了达到 400 lb/in^2 (2.8 MPa) 的横向预应力。预应力路面板的厚度:公路平均为 5.75in (0.15m),机场平均为 6.5in(0.17m)。

在几项试验项目之后,美国修建的预应力机场路面很少;相反地,欧洲在 60 年代却修建了好几条预应力机场跑道和滑行道,并继而在主要的民用和军用机场也修建了预应力混凝土路面,使用效果很好。其中的大部分预应力机场路面,总面积大大超过 $400 \times 10^4 \text{ yd}^2$ ($330 \times 10^4 \text{ m}^2$),在纵向和横向均采用取得专利的预应力体系施加后张预应力,该预应力体系是在钢管中穿入高强钢筋作为预应力钢筋,张拉后对管道灌浆。

民用机场的路面厚度普遍采用为 7in(0.18m),这样的工

程包括:1965~1978年在 Schiphol 修建的 Amsterdam 主机场路面,面积为 $83 \times 10^4 \text{ yd}^2$ ($68 \times 10^4 \text{ m}^2$);1960~1968年修建的 Cologne-Bonn 机场路面, $66 \times 10^4 \text{ yd}^2$ ($53 \times 10^4 \text{ m}^2$),和 1972~1978年间在 Rio de Janeiro 修建的机场路面, $70 \times 10^4 \text{ yd}^2$ ($56 \times 10^4 \text{ m}^2$),军用机场中有 100 多万 yd^2 ($80 \times 10^4 \text{ m}^2$)、厚度为 5.5in (0.14m), $60 \times 10^4 \text{ yd}^2$ ($50 \times 10^4 \text{ m}^2$)、厚度为 6.3in (0.16m)的跑道和牵引道,以及 $20 \times 10^4 \text{ yd}^2$ ($17 \times 10^4 \text{ m}^2$)、厚度为 4.75in (0.12m)的加铺层路面已经建成使用。

1.4.2 1960 年以后的发展状况

60 年代的工业发展和应用研究为在美国成功地采用预应力混凝土路面提供了前景,其中主要是塑料包裹油脂防护每股七丝的成卷高强度预应力钢绞线在结构预应力方面的应用日益广泛,使得对长混凝土路面能够采用施工方便而又经济的预应力钢束;另外,组合式的支承和紧密的夹片锚的广泛应用使夹固钢绞线的后张法钢绞线锚具的安装布置也比较容易;轻重量双缸开口千斤顶的发展加快了后张法预应力应用操作的简单化,使预应力路面板施工中单根钢绞线的后张成为一项简单易行的工作。

在预应力混凝土路面的发展市场方面,对低摩擦中介层或下承层材料和路面之间的中介层进行处理的研究结果具有一定的重要性。采用双层低摩擦型的塑料薄膜已可达到较低的摩擦力值 (Timms, 1963),这样的材料市场上已有供应。按照美国试验与材料学会的技术文件 2103 (ASTM D 2103)的方法,在实验室测定的摩擦系数最低可以达到 0.2。在现场施工中,由于基层施工条件的变化达不到这样低的摩擦力数值,然而,如果在比较平整的路基表面上铺上两层聚氯乙烯薄

膜要达到相当于 0.5 的路基摩擦系数值还是可能的,如果在两层聚氯乙烯薄膜之间再加入一层减小摩擦剂(例如,一层薄石蜡油层),还可以得到更低的摩擦系数值(美国运输部,1983)。

在美国,由于最近修建的几项预应力混凝土路面工程的使用性能良好,人们对修建预应力混凝土路面的信心正在增强(Gramling 等人,1983),在 1972 年结合新的概念设计出的公路路面已在靠近 Dulls 国际机场的公路上建成使用(Friberg 和 Pasko,1973)。在 400 ~ 760ft(120 ~ 230m)的长路面板上,均采用 $200\text{lb}/\text{in}^2$ (1.4MPa)的预应力。另外,还修建了更大规模的三项工程:1973 年在宾夕法尼亚(Brunner, 1975),1975 年在密西西比(Albritton, 1976)和 1977 年在亚利桑那(Morris 和 Emergy, 1977)修建的预应力路面。1985 年在德克萨斯又修建了一条预应力加铺面层(Burns 和 McCullough, 1986)。宾夕法尼亚 1988 年修建一项大型工程(Gramling, 1986),其设计经济的公路预应力路面的具体方法在下面第五章中进行介绍。以上列举的这些参考资料有的也涉及到了路面金属构件的防腐问题。

第二章 预应力混凝土路面与时间有关的变形和约束应力

2.1 预应力路面板的季节性长度变化

路面长度的变化主要与混凝土中温度的变化有关,混凝土的膨胀一般发生在寒冷季节浇筑的混凝土,由于温度影响以及路基的摩擦力对位移产生的约束有关。混凝土的热膨胀系数主要取决于粗集料的热膨胀系数,其变化范围大约在高标号石灰石的 $25 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{F}$ ($4.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) 和一般采用的硅质岩石的 $6.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{F}$ ($11.7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) 之间 (Emanuel 和 Hulsey, 1977), 净水泥的热膨胀系数略高。混凝土的热膨胀系数的测定值还与其龄期、温度和湿度有关,因此,路面的热胀特性随季节发生变化,热膨胀系数的季节性变化对长度的季节性变化也有影响。所以,最理想的是对每一项工程单独确定一个实际的热膨胀系数值,这样有利于对特殊情况进行分析,并便于为今后的应用积累资料。在实际确定热膨胀系数值有困难时,比较合适的方法是,采用完全饱和情况下的热膨胀系数值预计冬季的长度变化;采用这一热膨胀系数值的 1.5 倍预计夏季的长度变化;用二者的中间值预计其他季节的长度变化。

最小热膨胀系数值对石灰石骨料混凝土大约为 $3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{F}$ ($5.4 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$), 对硅质岩石骨料混凝土为

$6 \times 10^{-6}/F(10.8 \times 10^{-6}/^{\circ}C)$,在夏季条件下足龄期的混凝土路面,石灰质骨料混凝土的热膨胀系数可能达到 $4 \times 10^{-6}/F(7.2 \times 10^{-6}/^{\circ}C)$,硅质骨料混凝土为 $7 \times 10^{-6}/F(12.6 \times 10^{-6}/^{\circ}C)$ 。混凝土和集料的类型是主要因素,它控制着在预应力路面板之间预计的伸缩缝宽度的大小范围。

混凝土的季节性膨胀量(与预应力的大小无关)可抵消一部分由温度变化引起的板的季节性长度变化量,据观察,混凝土的这种单位长度的膨胀变形量均大于 100×10^{-6} 。

摩擦约束对季节性的温度位移不产生主要影响,但摩擦应力在长板设计中是一个主要考虑的因素。对最大长度大约为 600ft(180m)的预应力路面,设计要求的最小平均摩擦系数值为 0.5。这一摩擦系数值通过在混凝土路面下采用一层光滑性很好的双层聚氯乙烯薄膜(美国运输局,1983)是可以达到的,这种光滑性很好的双层聚氯乙烯薄膜的两层中间有一层减小摩擦剂,并要求铺放在压实和平整度良好的基层上。

结冻路基上的摩擦力变化范围可能很大(美国运输部,1983),在 Dulls 工程(Friburg 和 Pasko,1973b)中,位于结冻的基层上的路面在长 760ft(228m)的路面板中部附近出现的第一条裂缝就发生在混凝土的温度由 58F 下降到 16F($14 \sim -9^{\circ}C$)以后。由于这一原因,在低温情况下应当考虑采用不低于 0.7 的摩擦系数(美国运输部,1983)。如果路面下不采用减小摩擦层,还需采用更大的摩擦系数,究竟采用多大的摩擦系数合适,应在现场通过试验确定。

2.2 不同路面每年的温度-长度周期性变化——举例说明

在取得混凝土热膨胀系数的数据和热膨胀系数值随骨