

连续配筋混凝土 基层结构设计 方法研究

丁润锋 周少乐 著

非外借

 东北林业大学出版社
Northeast Forestry University Press

LIANXU PEIJIN HUNNINGTU
JICENG JIEGOU SHEJI
FANGFA YANJIU

连续配筋混凝土 基层结构设计 方法研究

丁润铎 周少乐 著

东北林业大学出版社
Northeast Forestry University Press

· 哈尔滨 ·

版权专有 侵权必究

举报电话：0451 - 82113295

图书在版编目 (CIP) 数据

连续配筋混凝土基层结构设计方法研究 / 丁润铎,
周少乐著. — 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 2016. 12

ISBN 978 - 7 - 5674 - 0984 - 2

I. ①连… II. ①丁… ②周… III. ①连续配筋混凝土路面—结构设计 IV. ①U416.216

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 015624 号

责任编辑: 赵 侠 刘天杰

封面设计: 宗彦辉

出版发行: 东北林业大学出版社

(哈尔滨市香坊区哈平六道街 6 号 邮编: 150040)

印 装: 三河市天润建兴印务有限公司

开 本: 710 mm × 1 000 mm 1/16

印 张: 11

字 数: 132 千字

版 次: 2017 年 9 月第 1 版

印 次: 2017 年 9 月第 1 次印刷

定 价: 48.00 元

前 言

随着经济的快速发展，我国高等级公路通车里程数不断刷新。由于车辆的超载、重载等原因，部分高等级路面的使用性能衰减过快，寿命大大缩短。为解决该突出问题，行业人员围绕结构、材料等方面进行了大量研究与实践，长寿命路面、全厚式路面、耐久性路面是其中成功的代表性成果。作为耐久性路面的一种新型结构，连续配筋混凝土基层沥青路面不仅具有行车舒适，养护费用低等特点，而且在寿命周期内，可以大幅度提高路面结构的耐久性能。特别是连续配筋混凝土基层配筋率低、强度高、经济、耐久，将会在重交通高等级公路中有良好的应用前景。

笔者长期关注国内外路面耐久性研究，以攻读硕士期间的研究成果为基础，之后通过不断学习与研究，结合试验与调查，逐步对连续配筋混凝土基层设计方法进行了修正与完善，为更好地推广耐久性路面的理念与新型结构的使用，将十余年的研究成果予以整理、出版。

本书首先通过有限元法，建立钢筋—混凝土分离式模型，对连续配筋混凝土基层进行荷载应力分析，得到了不同裂缝间距的两种临界荷

位；通过对结构参数的分析，得到基层模量、厚度等参数对其板底应力的影响规律。然后，采用解析法推导出连续配筋混凝土板在温缩、干缩等条件下混凝土与钢筋的应力及位移计算公式，并对温度、配筋率等参数进行影响分析；结合理论分析与国内外使用经验，建立了连续配筋混凝土基层结构设计方法，提出了纵向配筋率 $0.3\% \sim 0.6\%$ ，裂缝宽度最大 1.5mm 等设计推荐技术要求，并通过铺筑试验路段，研究连续配筋混凝土基层施工技术。最后，本书介绍了日本机场沥青道面半柔性材料修补设计，可为连续配筋混凝土基层沥青路面的快速养护提供借鉴；并详细介绍了日本连续配筋混凝土基层的使用案例。

本书由交通运输部公路科学研究院丁润铎副编审、中国航空规划设计研究总院有限公司周少乐高级工程师著述。主要分工如下：第1章、第2章、第7章由丁润铎、周少乐编写，第3章至第5章由丁润铎编写，第6章由周少乐编写。

本书所涉及的研究是在连续配筋混凝土面层结构设计方法研究的基础上进行的，并得到了长安大学陈拴发教授、王秉纲教授及交通运输部公路科学研究院曹东伟研究员的悉心指导；此外，交通运输部公路科学研究院王松根研究员、山东公路技师学院马庆雷研究员、长安大学陈华鑫教授、郑木莲教授、张洪亮教授、张驰副教授等师长、朋友在各方面给与了大量帮助。借此，表示由衷感谢。

谨以此书纪念恩师陈拴发教授、胡长顺教授。

目 录

1 绪 论	1
1.1 研究意义	2
1.2 连续配筋混凝土基层结构特性	3
1.3 国内外研究现状	5
1.4 研究内容	8
2 连续配筋混凝土基层荷载应力分析	9
2.1 连续配筋混凝土基层计算模型与参数	10
2.2 临界荷位的确定	16
2.3 参数影响分析	28
3 连续配筋混凝土基层温度应力分析	40
3.1 计算模型分析	41
3.2 温缩应力的计算	45

3.3	干缩应力分析	62
3.4	翘曲应力分析	66
4	连续配筋混凝土基层结构设计方法	72
4.1	连续配筋混凝土基层沥青路面温度场	73
4.2	设计标准	80
4.3	连续配筋混凝土基层设计	88
4.4	结构设计步骤	91
5	试验路合理设计及铺筑	97
5.1	连续配筋混凝土基层设计	99
5.2	连续配筋混凝土基层施工技术	107
6	日本铺装新技术与连续配筋混凝土基层使用案例	111
6.1	机场沥青道面半柔性材料修补设计	111
6.2	隧道薄层复合式路面试验段研究	131
6.3	适于积雪寒冷气候条件的新型路面	144
7	研究主要结论与问题	162
7.1	主要结论	162
7.2	有待研究的问题	164
	参考文献	166

绪 论

随着我国经济的迅速发展，高等级公路的里程不断增加，我国已成为世界高等级公路大国。截至 2015 年年底，全国高速公路通车总里程已突破 12 万千米。大批高等级公路的建成通车，在一定程度上减缓了我国交通瓶颈的限制，极大地推动了国民经济的快速增长。预计未来的十几年里，全国公路建设还处于大发展的黄金时期，根据《国家高速公路网规划》，到 2030 年，我国公路网总规模要达到 580 万千米，新建公路里程将大幅度增加。但应该看到，由于交通量的明显增长，车辆轴载以及重车比例的增大，部分沥青路面发生了不同程度的早期破坏。作为全国公路第一大省的山东省情况也不乐观，据对沥青路面的使用情况调查来看，相当一部分沥青路面在通车时间不长就出现了较多的裂缝、车辙、拥包、表面松散、剥落和坑洞等早期损坏，路面使用性能衰减过快，使用寿命大大缩短，远远达不到设计使用年限，即沥青路面的耐久性严重不足；在个别破坏严重的路段不得

不进行修复，造成重大的经济损失和不良的社会影响。

研究表明，在车辆荷载特别是重载和超载车辆的破坏作用下，基层强度呈现不足和衰减过快是造成沥青路面大范围出现早期破坏的主要原因。目前我国高等级公路路面结构主要是以无机结合料稳定粒料（土）类为基层、沥青混凝土为面层的半刚性路面。半刚性沥青路面整体强度较高，抗永久变形和抗行车荷载疲劳破坏能力较强，但是其收缩开裂问题长期以来一直没有得到很好的解决，并且日益突出，已成为沥青路面结构的主要缺陷。有调查表明，沥青路面早期裂缝中50%以上均属于半刚性基层先裂而导致沥青面层开裂的反射裂缝。路面一旦产生裂缝，如果不及时处理，雨水很容易从裂缝进入路面结构层，甚至通过结构层到达和进入土基，这种情况的发生必然带来路面其他类型的早期破坏。因此如何减少路面早期病害，防止路面反射裂缝，提高路面承载能力，大幅度延长路面使用寿命成为目前急需解决的问题。

1.1 研究意义

连续配筋混凝土路面（CRCP）能够克服接缝水泥混凝土路面（JCP）由于横向胀、缩缝的薄弱而引起的各种病害，该种路面纵向配有足够数量的钢筋，以控制混凝土路面板纵向收缩产生的开裂，因此CRCP在施工时完全不设胀、缩缝（施工缝及构造所需的胀缝除外），

形成一条完整而平坦的行车表面，改善了汽车行驶的平稳性，同时也增加了路面板的整体强度。连续配筋混凝土基层沥青路面，将连续配筋混凝土板下移，上面铺筑沥青面层。采用该种结构的路面不仅具有CRCP的优良特性，而且由于加铺沥青路面，可以进一步改善行车舒适性能。连续配筋混凝土基层沥青路面与传统的半刚性基层沥青路面相比，不仅具有相同的舒适程度，而且在寿命周期内，由于无须补强，这将大幅度提高路面结构的耐久性能。连续配筋混凝土基层沥青路面，养护费用低，具有寿命周期内总费用低的特点。开展此项研究工作，对降低投资成本，改善路面使用状况，提高路面使用寿命具有重大意义。

1.2 连续配筋混凝土基层结构特性

连续配筋混凝土基层在纵横向都配置了大量的钢筋，因此钢筋的特性对路面的整体性能起决定性作用。放置在混凝土结构中钢筋其主要作用是承受拉应力，以弥补混凝土抗拉强度的低下和延性的不足，约束路面板的变形，防止裂缝宽度增大。钢筋不存在干缩的问题，在温度和湿度变化下不会发生像混凝土那么大的体积变形量。钢筋具有很高屈服强度、抗拉强度以及体积变形率低的特性，这就有可能保证基层的连续性。试验证明，有明显屈服台阶的软钢，在其弹性极限范围内长期受力或反复加卸载都不发生徐变或松弛现象。

影响基层受力变形性质的钢筋参数有：纵向钢筋配筋率、钢筋尺寸、纵向钢筋在板内的埋设位置等。野外调查发现，当钢筋配筋率高于某一数值后，横向裂缝间距几乎不再发生变化；而低于1%时，影响显著。配筋率也影响着横向裂缝的宽度。连续配筋混凝土板的大部分应力是由裂缝处纵向钢筋通过应力传递的。这一应力传递取决于纵向钢筋表面积及其体表形状。对于相同的纵向钢筋配筋率，尺寸小的钢筋将具有较高的体表面积，在总量上传递给混凝土更多的应力。纵向钢筋在混凝土路面板内的埋置位置对横向裂缝间距有显著的影响。钢筋网一般布置在板厚的 $1/3\sim 1/2$ 处，也有采用双层钢筋网布置在板的上部及底部，钢筋的保护层最小厚度为6 cm。如果将纵向钢筋靠近板中性面设置，对板产生明显的约束作用，从而产生更多的横向裂缝。一般认为，钢筋用量大，裂缝间距和宽度就会小，钢筋布置深度小，即靠近板顶面时，裂缝间距和宽度小。同时，钢筋与混凝土的黏结力增大和采用半径较小的钢筋，能使裂缝间距及宽度减小。

钢筋与混凝土的黏结是钢筋与其周围混凝土之间的一种相互作用，通过传递使二者之间的应力及变形协调，是钢筋与混凝土两种材料共同工作的基础。而黏结应力通常就是指钢筋与混凝土接触面上的剪应力。钢筋与混凝土之间的黏结力由三部分组成^[3]：第一，混凝土中的水泥凝胶体在钢筋表面产生的化学黏着力或吸附力，其黏结强度取决于水泥的性质和钢筋表面的粗糙程度；第二，混凝土对钢筋的摩阻力，当混凝土的黏结力破坏后发挥作用，其大小取决于混凝土发生收缩或荷载和反力等对钢筋的径向压应力，以及二者间的摩擦系数

等；第三，钢筋表面粗糙不平，或变形钢筋凸肋和混凝土之间的机械咬和作用。由于混凝土中钢筋的存在，连续配筋混凝土基层裂缝不会太宽，裂缝一般不能穿过钢筋层而发展成为上下贯穿的通缝，也不会延伸到钢筋表面，结构钢筋不会受到锈蚀，因此使用寿命会延长且使用性能不会改变。另外，由于基层底部的疲劳裂缝很难传递到该层顶部，而且该层的温缩和干缩裂缝也很窄，对于沥青路面，即使不采取防裂措施也不会出现反射裂缝。依据试验路调查及国外使用经验，连续配筋混凝土基层破坏主要形式为钢筋拉断及板边冲断。温度荷载是连续配筋混凝土基层使用前期破坏的主要因素，车辆荷载为其后期破坏的重要因素。

连续配筋混凝土基层沥青路面与传统的半刚性基层沥青路面相比，不仅具有相同舒适程度，而且在寿命周期内，允许对连续配筋混凝土基层进行多次沥青罩面，将大幅度提高结构的耐久性能。连续配筋混凝土基层沥青路面，维修作业时交通干扰小，养护费用少，基层配筋率较 CRCP 低，具有寿命周期内总费用低的特点。

1.3 国内外研究现状

为了提高路面使用寿命，各国道路工作者相继进行了许多研究工作，其中沥青混凝土复合式路面（RCC+AC）以及连续配筋混凝土路面（CRCP）为不同研究的方向。

1985年,西班牙某高速公路拓宽车道的施工中,采用在基层为15 cm厚的水泥稳定基层上铺筑23 cm厚的RCC层,RCC层板加铺5 cm的热拌沥青混合料。1989年澳大利亚Penith地区成功地在水泥稳定基层上修筑了RCC-AC复合式路面。1988年日本在某停车场对RCC作为沥青混凝土下层的适应性进行了研究,并将这种路面结构形式写入1990年6月出版的《碾压混凝土路面技术指南(草案)》中。“八五”期间,由原西安公路交通大学承担的研究课题,对RCC-AC复合式路面从设计理论、设计方法与参数选用到施工技术进行了深入研究,并编写RCC-AC复合式路面设计施工须知,用于指导生产实践。

对于连续配筋混凝土路面的研究,国外进行得较早。美国于1921年最先使用CRCP。第二次世界大战后,在伊利诺斯、得克萨斯、加利福尼亚、马里兰、新泽西等州修筑了CRCP路面,经多年使用性能良好。在美国修建高速公路时(州际与国防公路系统)大量采用了CRCP路面。按折合成双车道计,到1980年美国已建成的CRCP路面达2.26万千米。比利时最早的CRCP路面是20世纪50年代修建的,大量修筑CRCP是在70年代以后。在1970~1990年,比利时大约修建了1800 m²的CRCP,其中包括旧混凝土路面,沥青路面上的加铺层350万平方米。我国在1989年9月在江苏省盐城市东郊一级公路上修筑了第一条CRCP试验路,长500 m,宽7 m,厚20 cm的CRCP试验路,用以长期观测,具体研究其各方面的性能。1997年,由原西安公路交通大学承担了国家自然科学基金资助项目,开展连续配筋混凝土路面设计理论与方法研究。

随着公路科技的发展,连续配筋混凝土基层沥青路面逐渐成为新的研究课题。英国为了解决维修干扰问题,于1932年最早引入连续配筋混凝土基层。19世纪40~50年代用于一些城区道路上,1957年在伦敦和丹地附近铺筑了试验路,1985年铺筑了长达8 km(双车道)的路面。日本道路公团(JH)长期致力于长寿命化路面的研究,对连续配筋混凝土基层系统研究较早,自1990年起,先后在山阳汽车专用道、第二东名·名神高速公路、伊势湾岸汽车专用道等铺筑了连续配筋混凝土基层沥青路面。西泽辰男等采用Winkler地基上的薄板有限元法和复合平板理论建立解析模型,并进行疲劳计算,研究了连续配筋混凝土基层设计方法。高桥修二等通过实测数据对连续配筋混凝土基层沥青路面的温度分布规律进行了探索。

在我国,连续配筋混凝土基层尚处于研究阶段。2003年,叶丹采用有限元方法,用等参八结点四边形单元作为分析的基本有限元单元,用组合单元的方法模拟钢筋的纵向加劲作用,建立了分层式模型分析连续配筋水泥混凝土板(CRCP)的受力特性,并利用断裂力学理论计算分析CRCP层底裂缝和HMA层底反射裂缝的应力强度因子的发展情况。长安大学与山东省公路局合作,于2003年开始全面开展连续配筋混凝土基层设计与铺筑技术的研究工作,并先后于2004年和2005年铺筑了试验路段。

1.4 研究内容

对于连续配筋混凝土基层结构设计方法主要开展以下研究：

第一，结合连续配筋混凝土基层沥青路面的承载特性以及可能产生破坏原因，应用有限元法建立计算模型，分析层底应力，确定临界荷位。

第二，对地基模量 E 、沥青层厚度、连续配筋混凝土厚度、基层配筋率、配筋位置等参数进行影响分析，寻找影响层底应力的主要因素。

第三，依据试验路段的温度观测数据，分析连续配筋混凝土基层沥青路面内部的温度变化规律，建立温度分析模型，利用解析法，确定温度荷载作用下的最不利位置，进行干缩应力、翘曲应力、温缩应力分析。

第四，结合国内外使用经验，分析基层破坏原因及形式，开展结构设计方法研究，探寻基层低配筋的理论依据。

第五，总结试验路现场铺筑经验，摸索连续配筋混凝土基层施工技术。

连续配筋混凝土基层荷载应力分析

连续配筋混凝土基层，主要用于重载交通高等级公路沥青路面。在结构上，充分利用水泥混凝土的高抗压能力，在行车荷载作用下，连续配筋混凝土板为主要的承重层。本章为了研究连续配筋混凝土基层的设计方法，首先要对该种结构由行车荷载所产生的荷载应力进行科学分析，以探寻连续配筋混凝土基层的最不利荷位及各设计参数对应力分布的影响规律。

2.1 连续配筋混凝土基层计算模型与参数

2.1.1 计算模型

连续配筋混凝土基层在工作环境下，因混凝土硬化产生的干缩和降温产生的温缩受到外部阻力，在其内部会产生横向细小裂缝（图 2-1），以至于长期处于在带缝工作状态。对于连续配筋混凝土面层，其缝宽一般为 0.58~1.2 mm。连续配筋混凝土基层相对于面层来讲，结构层下移，受环境影响较小，对其缝宽要求理论上可适当放宽。因此，为了计算分析方便，缝宽取 1.0 mm。

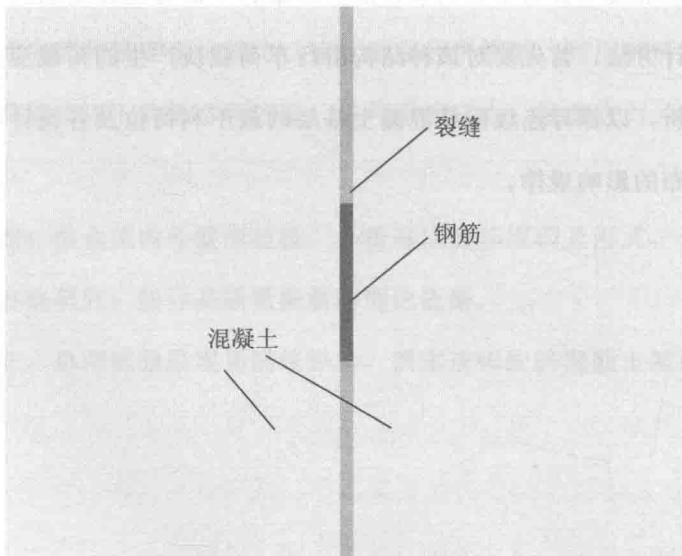


图 2-1 裂缝