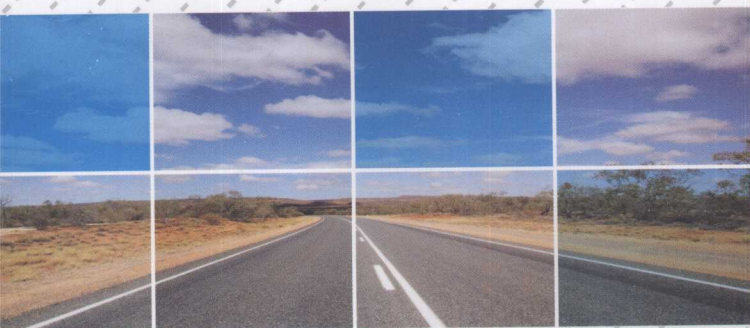


专著 MONOGRAPH



TECHNOLOGY

李来宾 李晓军 编著

多孔改性水泥混凝土基层 复合沥青路面 修筑技术研究

西北工业大学出版社



TECHNOLOGY

2010 2011 2012

多孔改性水泥混凝土基层
复合沥青路面
建筑技术研究

中国石化出版社

多孔改性水泥混凝土基层 复合沥青路面修筑技术研究

李来宾 李晓军 编著

西北工业大学出版社

【内容简介】 本书在回顾了国内外多孔水泥混凝土研究现状的基础上,以美国公路 460 阿波马托克斯段为对象,阐述了美国排水基层失败的经验以及应吸取的教训。在分析了目前对多孔水泥混凝土结构与力学特性关系认识的基础上,阐述了多孔改性水泥混凝土与传统多孔水泥混凝土组成和内部结构的区别。明晰了多孔改性水泥混凝土强度机理,提出了多孔改性水泥混凝土配合比设计思路。测定了多孔改性水泥混凝土的路用性能指标。模拟了多孔改性水泥混凝土基层路面温度场的分布并与实测结果进行了对比。针对多孔改性水泥混凝土颗粒分布的空间复杂性对弯拉特性、模量和应力控制疲劳试验结果的影响,提出了以路面承载应力水平和路酸力变形为控制指标的路面结构设计方法。应用了莫尔圆法分析、对比了不同位置不同深度剪应力,认为剪应力的主应力组成方式,特别是拉-压复合剪切现象对路面结构疲劳寿命有重大影响,为解释 TOP-DOWN 裂纹与车辙共同出现提供新的观点,为开发沥青新材料提供了理论基础。最后总结了试验的施工工艺、质量控制与经济效益分析。

本书可供高速公路设计与施工的技术人员使用,也可供高等院校相关专业师生教学参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

多孔改性水泥混凝土基层复合沥青路面修筑技术研究/李来宾,李晓军编著. —西安:西北工业大学出版社,2013. 11

ISBN 978-7-5612-3863-9

I. ①多… II. ①李…②李… III. ①水泥混凝土路面—沥青路面—筑路—研究 IV. ①U416.216
②U416.217

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 279320 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:<http://www.nwpu.com>

印 刷 者:长安区第二印刷厂

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:13.625

字 数:326 千字

版 次:2013 年 11 月第 1 版

2013 年 11 月第 1 次印刷

定 价:98.00 元

序 言

“十二五”时期,我国将建成小康社会,社会经济发展将进入一个新的历史阶段,交通运输也将进入新的发展时期。到“十二五”末,我国高速公路总里程将达到 7.41 万公里。加速产业结构、产品结构的优化升级,货物运量增加,公众出行需求旺盛,对运输服务的安全性、舒适性、快捷性、环保性、资源节约性等都提出了更高要求。高速公路交通流迅速增长,通行车辆中重型车辆与日俱增,按传统的路面设计体系和设计标准所设计的路面通常不到设计年限就出现了损坏。维修造成的交通拥堵以及运输成本的高居不下,给社会经济发展带来极大的压力。因此,如何修建满足社会车辆载重需求的长寿命、高耐久性路面,建设资源节约型、安全保障型和环境友好型的高速公路,减少路面维修,提升公路路面服务水平,降低原材料消耗,节约能源资源,降低交通事故率,提高公路经济社会效益等,是摆在公路建设者面前的一道难题。

为了解决上述难题,经过数年努力,邢台路桥建设总公司研发的多孔改性水泥混凝土复合沥青路面,2004 年获得国家专利授权,目前已经在河北省多条高等级公路中应用。该公司采用的是典型的多孔混凝土基层+排水路面的路面结构形式。其显著特点在于:①采用具有独特内部结构的等粒径多孔改性水泥混凝土作为基层,承载力大、抗水浸损坏;②采用抗老化特性、抗车辙能力强的聚合物改性沥青碎石作为应力吸收层及表面功能层。结构层配比设计和施工较传统路面简单,一次性投资成本比传统沥青路面结构造价低,使用寿命比传统沥青路面和水泥砼路面长。连续 7 年,对所投入使用的路面进行跟踪观测,未发现有水毁、雨雪冻融破坏、颗粒松动及泛油、路面光滑、车辙等病害现象。“从整体结构观测,无论是全透水结构还是基层底排水结构,均未发现水损坏路面现象。”这种路面与传统路面相比,还有降低噪声、雨天水雾少、刹车效果好等优点。

为了弄清楚邢台路桥多孔改性水泥混凝土独特的内部结构与力学特性,2010 年成立了课题组开展了相关研究工作。

主要研究成果包括:

1. 发明了一种全新的基层材料

(1)邢台路桥等粒径多孔改性水泥混凝土采用单一等粒径或单一近似等粒径的集料作为混凝土骨料,不再采用级配组合,通过改性水泥方法,提高水泥膜的厚度来完成集料之间的强度连接,不需要开展级配设计。

(2)多孔改性水泥混凝土基层,采用的材料为岩石颗粒料和水泥、水和改性剂,其结构本身具备了遇水浸不塑化、强度不减的性质,解决了基层怕水泡的问题,而且一定的膜厚又解决了冻融强度不减的问题,具有了良好的路用性能。

(3)采用等粒径集料,结构受力的应力集中位置发生了质的变化,将传统密实性结构受力的应力集中在膜与集料之间,转变为应力集中转向集料颗粒内部,从而使破坏特征表现为集料断裂。这一力学结构特性的转移,使决定路面基层承载力和疲劳寿命的膜及膜与集料黏接强度,转为集料颗粒本身的强度。这一决定性的转移,赋予了结构更大的承载能力和更长的使用寿命。

(4)采用了等粒径集料后净水泥浆形成一定膜厚固结集料,形成了孔隙率的最大化,并在结构内部形成了有益的连接孔,有助于在结构内部形成比较均匀的温度场,从而减小了基层的温度梯度,避免了混凝土基层的翘曲和隆起,消除了温度应力对基层的影响,减少和延缓了收缩裂缝的产生。

2. 设计了一种新的路面结构

典型的多孔混凝土基层+排水路面是一种新的路面结构形式。其显著特点在于:①采用具有独特内部结构的等粒径多孔改性水泥混凝土作为基层;②采用抗老化特性、抗车辙能力强的聚合物改性沥青碎石作为应力吸收层及路面功能层。结构层配比设计和施工较传统路面简单,一次性投资成本比传统沥青路面结构造价低,使用寿命比传统沥青路面和传统水泥砼路面长。同时具有降低噪声、雨水雾少、刹车效果好等优点。

3. 提出了一种路面基层设计理论

针对多孔改性水泥混凝土颗粒分布的空间复杂性对抗弯拉特性、模量和应力控制疲劳试验结果的影响,提出了以路面承载应力水平和路面受力变形为控制指标的路面结构设计方法,避免了以往设计理论中材料参数测定以及流量预测中带来的误差,并对道路分级进行了新定义。这是适应社会需求的科学方法,也是对弹性层状连续体系理论在路面基层设计理论上的—次创新、发展与实践。

4. 提出了一种 TOP-DOWN 裂纹与车辙破坏的解释方法

利用莫尔圆分析了高模量基层路面结构中不同深度的应力状态,重点对比了不同位置、不同深度剪应力的主应力组成方式。认为:①拉-压复合剪切状态是 TOP-DOWN 裂纹与车辙破坏的重要诱因之一,疲劳状态下剪应力组成方式不同,对路面结构的疲劳寿命有重大影响;②可以用内聚力 c 与抗拉强度 σ_t 作为高模量基层路面材料剪切控制指标。

5. 提出了一套新的路面基层施工方法

针对所研发的新的基层材料,发明、改装了石料整形机、多孔混凝土拌合站等施工设备和相应的工法,丰富了施工工艺和质量控制方法。

本课题取得的主要研究成果是邢台路桥建设总公司近 10 年来科研成果的结晶。这些成果的推广与应用必将改善我国沥青路面结构设计、提高沥青路面整体质量,从而为延长沥青路面使用寿命奠定坚实的理论和实践基础。

王亚清

前 言

近年来,随着高速公路通行车辆中重型车辆与日俱增,按传统的路面设计体系和设计标准设计的路面通常不到设计使用年限就出现了损坏,水损害与重轴载联合作用被认为是带来这种损坏的主要原因之一。

为了解决上述难题,经过数年努力,邢台路桥建设总公司研发的多孔改性水泥混凝土复合沥青路面 2 肋 4 年获得国家专利授权。为了探索邢台路桥多孔改性水泥混凝土独特的内部结构\力学特性与路用性能,邢台路桥建设总公司开展了大量的科研工作。在吸收了国内外最新研究成果的基础上,结合邢台路桥建设总公司近 10 年的研究工作,笔者撰写了本书。

全书共分 10 章。第 1 章为回顾。以美国公路 460 阿波马托克斯段为对象,重点分析了美国排水基层失败的经验与教训,并介绍本书的相关研究内容。第 2 章为多孔改性水泥混凝土组成特性与制备。重点阐述了多孔改性水泥混凝土与传统多孔水泥混凝土组成和内部结构的区别。提出了多孔改性水泥混凝土配合比设计思路,列出了经验配比。第 3 章为多孔改性水泥混凝土路用性能指标测定。第 4 章为多孔改性水泥混凝土基层路面温度场的测定与模拟。第 5 章为多孔改性水泥混凝土基层应力分析与设计。开展了多孔改性水泥混凝土沥青路面典型结构设计,给出了典型路面结构推荐表。第 6 章为多孔改性水泥混凝土基层层顶荷载形变理论。针对多孔改性水泥混凝土颗粒分布的空间复杂性对弯拉特性、模量和应力控制疲劳试验结果的影响,提出了以路面承载应力水平和路面受力变形为控制指标的路面结构设计方法。第 7 章为高模量基层沥青路面结构应力状态分析。利用莫尔圆分析了高模量基层路面结构中不同位置、不同深度剪应力的组成方式。认为拉-压复合剪切状态是 TOP-DOWN 裂纹与车辙破坏的重要诱因之一。第 8 章为试验路工程与性能观测。重点介绍了相关试验路的施工、质量控制。第 9 章为工程经济性分析。第 10 章为结论。本书第 1,4,5,7 章由李晓军撰写,其余章节由李来宾撰写,全书由李来宾修改和统稿。

本书的撰写和出版,得到了不少同行的支持,他们提出了很多宝贵意见,在此一并致以深切的谢意。

书中所提出的一些新观点、新看法还有待于今后进行更深入、细致的研究。由于水平有限,时间仓促,书中疏漏和不足之处在所难免,恳请专家和读者批评指正。

李来宾

2013 年 11 月于邢台

目 录

第 1 章	回顾	1
1.1	沥青路面早期破坏与水损害	1
1.2	多孔水泥混凝土研究现状	1
1.3	多孔改性水泥混凝土应用现状	9
第 2 章	多孔改性水泥混凝土组成特性与制备	10
2.1	多孔改性水泥混凝土内部结构分析	10
2.2	多孔改性水泥混凝土内部结构与力学性能影响分析	16
2.3	等粒径多孔改性水泥混凝土配合比设计	34
2.4	小结	39
第 3 章	多孔改性水泥混凝土路用性能指标测定	40
3.1	强度性质研究	40
3.2	弹性模量	62
3.3	长期性及耐久性	64
3.4	抗冻性	70
3.5	疲劳特性	74
3.6	小结	82
第 4 章	多孔改性水泥混凝土基层路面温度场的测定与模拟	84
4.1	热力学相关理论	84
4.2	温度场实测方法与数据分析	87
4.3	有限元模型与参数	90
4.4	路面温度场模拟分析	95
4.5	小结	100
第 5 章	多孔改性水泥混凝土基层应力分析与设计	101
5.1	荷载应力分析	101
5.2	温度应力分析	107
5.3	多孔改性水泥混凝土基层沥青路面典型结构设计	111
5.4	关于抗拉强度结构系数的探讨	120

5.5 小结	121
第 6 章 多孔改性水泥混凝土基层层顶荷载形变理论	122
6.1 关于多孔改性水泥混凝土基层层顶荷载形变理论的说明	122
6.2 多孔改性水泥混凝土基层厚度的确定	128
6.3 弹性层状连续体系理论与层顶荷载形变理论对比分析	144
6.4 小结	147
第 7 章 高模量基层沥青路面结构应力状态分析	148
7.1 计算方案设计与计算结果分析的理论基础	148
7.2 计算结果分析	151
7.3 小结	186
第 8 章 试验路工程与性能观测	187
8.1 邢台试验路	187
8.2 廊涿高速试验路	189
8.3 大广高速试验推广工程	192
8.4 小结	199
第 9 章 工程经济性分析	200
9.1 直接效益	200
9.2 现值法分析长期经济性	201
9.3 小结	203
第 10 章 结论	204
参考文献	206

第 1 章 回 顾

近年来,如何修建满足社会车辆载重需求的长寿命、高耐久性路面,建设资源节约型、安全保障型和环境友好型高速公路,减少路面维修,提升公路路面服务水平,降低原材料消耗,节约能源资源,降低交通事故率,提高公路经济效益是摆在公路建设者面前的一道难题。本章以美国公路 460 阿波马托克斯段为对象,重点分析美国公路混凝土路面排水基层失败的经验与教训,阐述课题的相关研究内容。

1.1 沥青路面早期破坏与水损害

调查表明,造成沥青路面早期水损害破坏的原因,可以归结为沥青混合料空隙率过大、排水设施不完善、厚度偏薄、半刚性基层开裂等,主要表现形式包括坑槽、唧浆、松散、沉陷等等。近些年的经验表明,采用封堵的办法不能完全解决水损害带来的早期路面损害。设置路面内部排水系统,将进入路面结构内的水迅速排除是防治路面水损坏的根本途径。

排水沥青路面和排水基层是路面内部排水系统中的两个重要组成部分。国内以往主要采用的是排水沥青路面+封层+不排水基层的路面结构。这样的路面结构可以将侵入排水沥青路面层内部的自由水充分排出,但是无法完全避免基层表面滞水的存在。动水压力作用下,半刚性基层沥青路面结构依然存在着局部早期破损的风险。随着多孔水泥混凝土排水基层研究的开展,基层材料性质和基层整体质量对路面的使用性质和整体质量的影响已经日益被工程技术人员接受,以多孔水泥混凝土基层沥青排水路面为代表的典型排水路面结构已成为减少经济损失、延长路面使用寿命的有效手段。

1.2 多孔水泥混凝土研究现状

1.2.1 国内研究现状

多孔水泥混凝土以骨架空隙结构为特征,在满足一定承载能力的同时还具有较好的排水性,能及时、有效地缓解降雨带来的水损害,在其上覆盖排水沥青路面后,可有效缓解路表面积水、漫流、水漂、眩光等现象。多孔水泥混凝土用作基层时能迅速排除进入路面结构的水,减小路面早期的水损害,是一种具有良好的发展潜力和广阔应用前景的路面材料,尤其在近年来迅速发展的公路建设中呈现出了越来越明显的发展趋势,因此,国内针对多孔混凝土的路用性能展开了大量的研究,并取得了一定的成果。

中南大学陈瑜^[1-5]依托湖南省交通科技项目“高速公路隧道路面结构与材料应用技术研究”,对多孔水泥混凝土材料在抗滑、吸声以及排水等方面的性能进行了研究。他提出多孔水泥混凝土的理想结构模型为:特定粒级粗骨料颗粒被胶结浆体薄层包裹并在胶结点处联结,硬

化后形成骨架-孔隙结构,孔隙相互连通。他认为粗骨粒径组成合理、泥浆用量和稠度适中以及混凝土成型和施工方法保证目标孔隙率是形成多孔混凝土的条件;粗骨料的品种选择、粒径组成与颗粒表面形态等是影响多孔混凝土路用性能的关键因素,提出用于面层的多孔混凝土粗骨料必须选用压碎指标低、冲击值低、坚固性好、磨耗损失小而磨光值高的碎石,如花岗岩和玄武岩碎石,且粒形接近正方体者为佳,严格控制针状、片状颗粒含量;宜采用粒径较小和粒径组成范围较窄的粗骨料,推荐粗骨料粒径为5~10 mm。同时,他还指出目前对于路面工程存在的 key 问题是孔隙率过大,孔隙粗大、孔径尺寸及其分布不均匀,水泥石基体对粗骨料颗粒的握裹能力不足,界面过渡区薄弱,并由此带来大孔粗糙结构、工作性不良、强度低、耐久性差、表面构造抗滑性和内部孔隙吸声功能不能充分发挥、重交通路段刚性多孔材料难以抵抗车轮的往复冲击破坏等等一系列问题。

对于多孔水泥混凝土的路用性能,陈瑜等人围绕多孔混凝土路面抗滑、降噪功能的保持与恢复问题,初步认为多孔混凝土路面可以抵抗与多孔材料相匹配的交通等级路面车辆冲击而不破坏。同时,基于大量室内试验,系统地分析了多孔混凝土抗压强度随龄期变化的规律,抗压强度与抗折强度、抗折弹性模量的相关性及其疲劳性能,建立了相关数学模型;基于多孔混凝土组成材料和内部结构特点,研究其尺寸效应并给出抗压强度试验时不同尺寸试件的换算系数;探讨了多孔混凝土与普通混凝土的层间黏结性能及面层多孔混凝土的浇注时机与层间处理方式。结果表明,双参数 Weibull 分布可描述多孔混凝土弯拉疲劳寿命;多孔混凝土尺寸效应显著,经有效面积修正后有所下降,建议施工时底层混凝土浇注完后表面无须收光抹平,初凝完成时浇注面层多孔混凝土。

长安大学郑木莲^[6-14]从路面的水损坏及其防治入手,叙述了路面内部排水系统和排水基层的研究现状,着重研究了多孔混凝土的排水性能。他采用类比管道流和多孔介质中流动的方法,提出 Darcy 定律对于多孔混凝土的适用范围,并通过大量试验结果回归出多孔混凝土渗透系数与空隙率之间的幂指数关系;对多孔水泥混凝土力学性能的研究,采用应力控制模式和三分点加载方式,进行多孔混凝土的疲劳试验,同时利用双参数 Weibull 分布模型建立了不同失效概率下多孔混凝土两种形式的双对数疲劳方程;利用得出的疲劳方程,将多孔混凝土疲劳性能与常用半刚性基层材料 and 水泥混凝土进行比较,得出其疲劳性能优于常用的半刚性基层材料。此外,他还通过疲劳方程建立了多孔混凝土作为水泥混凝土路面下面层荷载应力计算的疲劳应力系数,以及作为沥青路面基层时,进行层底弯拉应力验算的抗拉强度结构系数,同时依据疲劳损耗等效原则,结合多孔混凝土的疲劳方程,得出多孔混凝土基层不同轴-轮型荷载换算为标准轴载的换算公式;在此基础上,综合路面排水分析和应力分析与结构计算两部分内容,提出多孔混凝土基层水泥混凝土路面的结构设计方法。

郑木莲等人认为,多孔混凝土的强度,无论抗压强度、弯拉强度或劈裂强度,主要取决于水泥的活性、水泥用量和水灰比等因素。在一定条件下,弯拉强度、劈裂强度与抗压强度有密切的关系。当抗压强度大时,弯拉强度和劈裂强度也大,反之亦然,但弯拉强度和劈裂强度较抗压强度低得多。同时,多孔混凝土是骨架空隙结构,其强度靠水泥胶浆的黏结力和粗集料间的摩阻力形成,集料与集料之间近于点接触。空隙率越大,其接触点越少,相应地强度越低,即空隙率和强度是此消彼长的关系。

华南理工大学李荣炜^[15-16]等人认为,在一定体积下,当粗骨料组成和用量恒定时,包裹粗骨料浆体的用量是影响孔隙率大小的主要因素,而浆体用量又决定了粗骨料的浆体包裹层厚

度。粗骨料浆体包裹层厚度越大,黏结点越多,黏结就越牢固,强度就越高,但孔隙率相应降低;当粗骨料浆体包裹层厚度减小时,虽然可以增大多孔混凝土孔隙率,但是由于粗骨料与浆体包裹层之间存在一个界面过渡区,其典型厚度一般在 $20\sim 40\ \mu\text{m}$,是其强度的最薄弱地带。如果包裹层的厚度变小,其界面过渡区厚度的比例就相应增大,同时再加上浆体黏结点减少,则多孔混凝土的强度就要降低。对粗骨料浆体包裹层厚度与其孔隙率之间的关系的研究,是通过将多孔混凝土中包裹水泥浆体的粗骨料堆积形态视为球形颗粒堆积,借鉴 Koenders 提出的带状模型,建立了多孔混凝土孔隙率与粗骨料浆体包裹层厚度之间的关系式,再通过试验确定公式中的参数并验证其模型和计算的合理性。研究认为,当粗骨料浆体包裹层厚度变化在 $439\sim 973\ \mu\text{m}$ 时,多孔混凝土的孔隙率为 $21.8\%\sim 33.8\%$ 。当多孔混凝土的孔隙率处于此范围时,粗骨料浆体包裹层厚度虽然大多只有几百微米,但多孔混凝土抗压强度可达 $10\ \text{MPa}$ 左右。

长安大学潘照洋^[17]、沙爱民对多孔水泥混凝土的配合比设计进行了研究,认为多孔水泥混凝土是由特殊的配合比设计和制备工艺制成的具有大量连通孔隙的混凝土,既有一定的强度,又有一定的透水透气性。其特殊性就在于不用或少用细集料(砂),粗集料紧密嵌挤的同时,水泥浆胶结固化在粗集料彼此之间的接触点处周围而形成较薄的一层水泥浆壳的骨架-孔隙结构。研究分析了多孔水泥混凝土的结构特点,借鉴填充包裹理论,提出了完整可靠的配合比设计方法。同时,他们提出了多孔水泥混凝土的强度形成理论,并针对水灰比、孔隙率与强度的关系进行了研究。多孔水泥混凝土的强度随孔隙率的增大而下降,两者间线性关系明显,推荐 $5\sim 10\ \text{mm}$ 的单粒径级配集料对应的水灰比最佳取值范围为 $0.22\sim 0.26$,目标孔隙率范围为 $15\%\sim 20\%$ 。

四川大学谢新生^[18]等人为探索适合多孔生态混凝土的配合比设计方法,采用正交试验法对多孔生态混凝土的抗压强度和孔隙率及主要影响因素进行了试验研究,设定多孔生态混凝土的目标强度为 $15\ \text{MPa}$,目标孔隙率为 $20\%\sim 30\%$,强度设计时仍采用传统混凝土的配合比设计理论进行试验。结果显示,试样的实测孔隙率为 $13.8\%\sim 31.5\%$,平均值为 25.24% ,与目标值相近;实测抗压强度为 $3.49\sim 18.2\ \text{MPa}$,平均值为 $9.75\ \text{MPa}$,仅为理论值的 $9.21\%\sim 48.02\%$ 。当孔隙率超过 20% 时,强度随孔隙率的增加快速下降。在孔隙率为 31.5% 时,强度仅 $3.49\ \text{MPa}$,与目标强度相差较大。试验结果也表明,多孔生态混凝土的强度和孔隙率除受水灰比的影响外,灰集比是主要影响因素。灰集比越大,抗压强度越高,但孔隙率也随之减小,说明现有混凝土的强度理论不适合多孔生态混凝土的配合比设计。

王智^[19]从材料的力学性能角度根据多孔混凝土的结构特征和功能要求,依据配合比设计的原则,将骨料颗粒表面用胶结材料包裹,并将骨料颗粒互相黏结起来,形成一个整体,具有一定的强度,确定了以孔隙率为主设计参数、通过改变胶结材料和骨料粒径来满足强度的配合比的设计思路。设计方法为首先根据设计要求确定选用的材料,再确定单位体积混凝土中骨料的用量,然后根据骨料的表观密度和设计要求的孔隙率确定胶结材料用量,最后根据成型工艺的要求确定水灰比,从而确定单位体积水泥用量和拌合水用量。试配结果表明该多孔混凝土配合比设计方法具有可靠性和可行性。

杨志锋^[20]等人研究了 $0\sim 4.75\ \text{mm}$ 粒的比例,粗集料最大粒径以及 $9.5\sim 4.75\ \text{mm}$ 颗粒在粗集料中的比例对多孔混凝土透水基层抗压强度的影响。研究表明,即使多孔混凝土透水基层的水泥用量仅 $150\ \text{kg}/\text{m}^3$,在 $4.75\ \text{mm}$ 通过率控制为 $10\%\sim 15\%$ 的条件下,所配制的多孔混凝土透水基层不仅具有较高的强度,还具备了良好的透水性能;最大粒径增加,强度降低,

透水性增加;粗集料的 9.5 mm 通过率控制在 20% 左右时,颗粒粒子之间基本没有干涉,配制的多孔混凝土透水基层强度最大。

国内对多孔混凝土力学性能的研究认为,多孔混凝土的强度主要受骨料颗粒形状大小和孔隙率控制。压碎指标低、冲击值低、坚固性好、磨耗损失小而磨光值高且粒径较小和粒径组成范围较窄的碎石做骨料的多孔混凝土强度较高;多孔混凝土孔隙率越大,则集料与集料之间接触点越少,相应地多孔混凝土强度越低。同时,研究认为多孔水泥混凝土的疲劳失效概率符合双参数的 Weibull 分布,建立了多孔水泥混凝土双对数疲劳方程,并提出了多孔水泥混凝土作为基层的路面结构设计以及相应的抗拉强度结构系数,使多孔水泥混凝土用作公路基层材料具有一定的理论基础。

1.2.2 美国混凝土路面排水基层现状与分析

1.2.2.1 背景

2008 年美国混凝土路面协会(ACPA)发布报告(见图 1-1),认为“室内实验中渗透系数大于 107m/d 的级配、稳定与未稳定、透水(底)基层不再推荐为混凝土路面结构设计单元”,并指出该结论是基于“现场实际经验与全美范围路用性能评估的结果”。报告同时给出了不推荐使用的 6 个原因。

为了得到一手的详细资料和感性认识,更好地理解报告中“不推荐使用的 6 个原因”,2011 年 10 月 9 日笔者对报告中所提到的美国公路 460 阿波马托克斯段进行了调研(见图 1-2)。调研包括美国排水基层相关评估报告、论文的阅读、阿波马托克斯段现场感性认识、资料整理等,充分对比分析了“不推荐使用的 6 个原因”这一结论的来龙去脉,为后续的研究工作奠定了基础。

Permeable Subbases: Reasons to Avoid Their Use

The inclusion of permeable (open-graded) subbases in concrete pavement structures is no longer recommended for many of the reasons discussed herein.

The use of highly open-graded and permeable subbase layers (stabilized or unstabilized) with a permeability coefficient of more than about 350 ft/day (107 m/day) in laboratory tests are no longer recommended as a design element in concrete pavement structures. This conclusion was reached through experiences in the field and it is supported by a national performance evaluation study. Furthermore, concrete pavement structures that include permeable systems can cost as much as twenty-five percent more than conventional concrete pavement structures, substantially increasing project costs without a proportionate increase in performance. This publication details these and several other reasons to avoid the use of permeable subbases. More on the topic of permeable subbases is available in ACPA's EB204P, "Subgrades and Subbases for Concrete Pavements."

图 1-1 ACPA 报告截图



图 1-2 地理位置

1.2.2.2 美国公路 460 阿波马托克斯段简介

阿波马托克斯镇隶属弗吉尼亚州(Viginia),美国南北战争结束地,历史名城。美国公路 460 阿波马托克斯段位于小镇的北部,长 2.8 mi(1 mi $\approx$ 1.61 km),双向四车道,修建于1993—1994 年。

路面结构从上至下依次为 9 in(1 in=2.54 cm)设接缝传力杆普通混凝土路面(JPCP)、4 in 水泥稳定开级配排水层(OGDL)和 6 in 10%水泥稳定细粒土,路肩为不设接缝传力杆普通混凝土路面(JPCP),厚度为 4~9 in;路肩下为 4 in 碎石垫层。设计年限 30 年,累计标准当量轴载(ESAL)8 000 000。混凝土 28 天劈裂模量 650 psi(1 psi=6.897 6 kPa),约 4.5 MPa,弹性模量 3 705 psi,约 25 MPa。土基 K 值为 193 psi/in。其主要设计参数和典型路面结构的原始资料如图 1-3 和图 1-4 所示。

- 预计 30 年的累计标准当量轴载:8 000 000 次
- 可靠度水平(%):95
- 总标准偏差:0.35
- 波特兰水泥混凝土 28 天平均劈裂模量:650 psi(约 4.48 MPa)
- 波特兰水泥混凝土 28 天平均劈裂模量:3 705 psi(约 25.55 MPa)
- 荷载传递系数 J :3.20
- 路基系数(K)值:193 psi/in²(约 0.52 MPa)
- 整体排水系数(C_d):1.20
- 初始可服务性:4.5
- 极限效果:2.5

图 1-3 主要设计参数

1. 9.0 in(约 22.86 cm)设接缝传立杆普通混凝土路面,15 in(约 457.20 cm)的间隔
2. 4.0 in(约 10.16 cm)水泥稳定开级配排水层
3. 6.0 in(约 15.24 cm)含 10%水泥的水泥稳定细粒土
4. 6.0~9.0 in 处,路肩为可变深度不设接缝的水泥混凝土路面
5. 4.0 in 骨料基层材料,型号为 I,大小为 21A(路肩)
6. 路面边缘排水可按照 VDOT 标准(VDOT,1991)中的 UD-4 条款进行

图 1-4 典型路面结构

从 1998 年起至 2004 年期间,该路段东部车道和西部车道均出现了路面开裂、沉降。2003 年日均车流量(ADT)11 000 次,重车 14%。2004 年日均车流量(ADT)15 000 次,重车 6%。2004 年弗吉尼亚州交通部替换了其中破损严重的 137 块混凝土板(详细情况可参见图 1-5~图 1-12)。



图 1-5 西侧起点与匝道



图 1-6 路面不均匀沉降错台



图 1-7 混凝土路面与排水层芯样



图 1-8 维修中展现出的路面结构



图 1-9 维修过程中降雨带来的积水



图 1-10 路肩的使用导致排水通道不畅



图 1-11 修复后的路面(一)



图 1-12 修复后的路面(二)

1.2.2.3 ACPA 不推荐使用排水基层的 6 个原因

(1)集料断裂使混凝土板失去支撑(Loss of support due to breakdown of aggregates)。ACPA 报告认为,“均匀荷载作用与排水基层非均匀表面会造成集料尖角处出现较高的应力集中现象”(见图 1-13),从而造成混凝土板下产生较大不均匀沉降,进而混凝土板在交通荷载作用下产生裂纹。

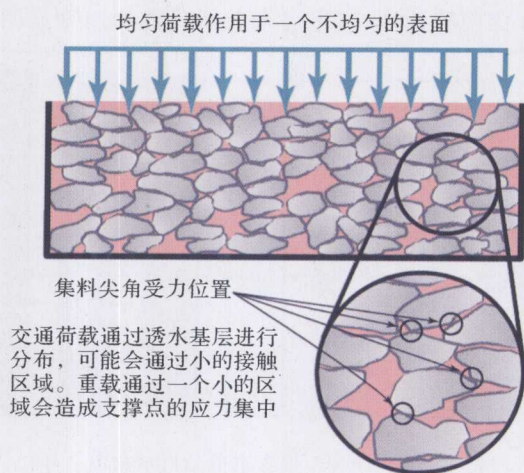


图 1-13 ACPA 报告关于应力集中的示意图

(2)加固土遇水后浸入排水基层使混凝土板失去支撑(Loss of support due to infiltration of the subgrade into subbase)(见图 1-14)。

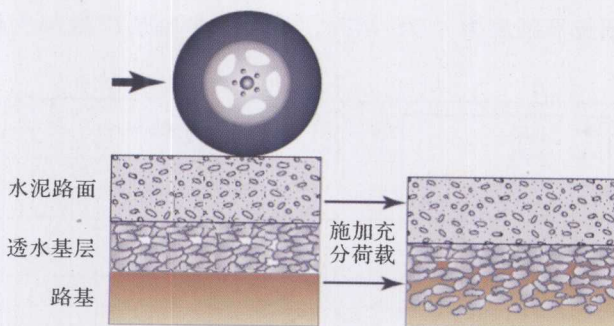


图 1-14 ACPA 报告关于加固土浸入排水基层的示意图

(3)灌缝料渗入基层导致早期裂纹(Early age cracking due to penetration of mortar from the concrete pavement into the subbase)。其原因在于受路面荷载作用,灌缝料软化点低,会脱落或渗入排水基层中,造成混凝土板早期开裂。

(4)不能作为稳定的施工平台(Instability as a construction platform)。水泥或沥青稳定的排水基层,以及密级配但水可自由流动的碎石排水基层可以作为稳定的施工平台,但未经过加固的级配排水基层不利于滑模摊铺机开展水泥路面施工。

(5)整体路用性能(Overall field performance)。ACPA 报告认为,“对于设计了接缝传力

杆、拉杆且设计合理的水泥混凝土路面,排水基层对于减少接缝破坏作用不明显;对于未设接缝传力杆、拉杆的水泥混凝土路面,排水基层对于减少接缝破坏作用明显,但排水基层必须设计完善,否则排水基层会被细集料污染,使得接缝破坏扩展”。

(6)造价(Cost effective)。ACPA 报告认为,“排水基层造价高于其他形式基层 15%~30%,只有延长道路使用寿命 8~10 年,其造价才合理。但过去 20 年的经验表明,排水基层并未延长道路使用年限到造价合理的地步,这里还未包括其他费用”(见图 1-15)。

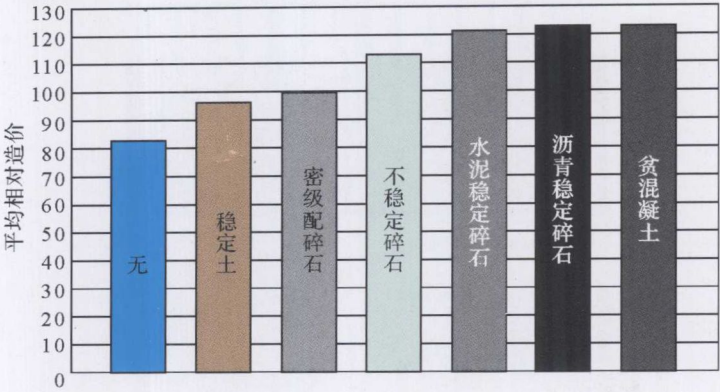


图 1-15 ACPA 报告造价分析示意图

1.2.2.4 美国排水基层力学属性、路面结构形式与经验教训

1. 力学属性与路面结构形式

美国排水基层典型级配曲线和配合比如图 1-16 所示。级配曲线显示,12.7 mm 粒径颗粒通过率占 40%~70%,配比如下:水泥 113 kg/m³,集料 1 613 kg/m³,水 52.63 kg/m³,减水剂 0.026 kg/m³。无侧限抗压强度为 4.35 MPa。美国排水基层冻融与无侧限抗压强度的关系,如图 1-17 所示。

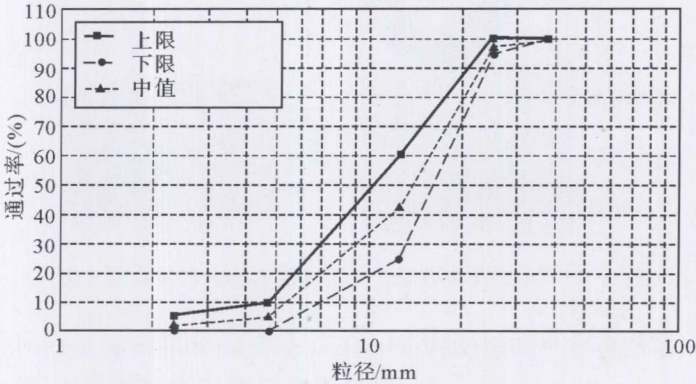


图 1-16 美国排水基层试验段典型级配

美国排水基层厚度小,直接作用在加固土底基层上,使得排水通道短,且容易堵塞。由于混凝土板本身不透水,水进入排水基层后,动水压力减小,难以形成稳定流。

2. 美国排水基层失败的经验教训

(1)多孔水泥混凝土强度不能过低;