

CHUIZHI ZHENDONGFA
SHUINI WENDING SUISHI SHEJI YU SHIGONG JISHU

垂直振动法 水泥稳定碎石设计 与施工技术

蒋应军 乔怀玉◎著



人民交通出版社
China Communications Press

CHUIZHI ZHENDONGFA
SHUINI WENDING SUISHI SHEJI YU SHIGONG JISHU

垂直振动法 水泥稳定碎石设计 与施工技术

蒋应军 乔怀玉◎著



人民交通出版社
China Communications Press

内 容 提 要

本书以作者近年来的科研成果为基础,详细地阐述了垂直振动法水泥稳定碎石设计与施工技术。内容包括:水泥稳定碎石垂直振动法及其可靠性、基于垂直振动法水泥稳定碎石力学特性与路面结构设计参数、基于垂直振动法抗裂型水泥稳定碎石设计与施工技术。

本书内容丰富新颖,系统全面,理论联系实际,具有较强的操作性,可供道路基层研究、设计及工程施工人员和相关专业师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

垂直振动法水泥稳定碎石设计与施工技术 / 蒋应军, 乔怀玉著. — 北京: 人民交通出版社, 2012. 1

ISBN 978 - 7 - 114 - 09513 - 9

I. ①垂… II. ①蒋… ②乔… III. ①碎石 - 水泥混凝土路面 - 路面施工 IV. ①U416.214②U416.216

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 246607 号

书 名: 垂直振动法水泥稳定碎石设计与施工技术

著 作 者: 蒋应军 乔怀玉

责任编辑: 赵瑞琴

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.ccpress.com.cn>

销售电话: (010)59757969, 59757973

总 经 销: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京市密东印刷有限公司

开 本: 787 × 1092 1/16

印 张: 9.5

字 数: 226 千

版 次: 2012 年 1 月 第 1 版

印 次: 2012 年 1 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-09513-9

印 数: 0001—3000 册

定 价: 28.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

前言

改革开放以来,是我国公路事业发展最快、建设规模最大、最具活力的时期,期间我国公路建设实现了跨越式发展,取得了举世瞩目的成就。到2010年底,我国公路总里程达到398.4万km,高速公路7.4万km,居世界第二位,二级及以上公路里程44.73万km。进入“十二五”以来,我国的公路交通建设坚持适度超前的原则,继续保持交通运输基础设施建设的适度规模和速度。

按照“十二五”期间公路发展的具体目标,五年内我国公路总里程达到450万km,国家高速公路网基本建成,高速公路总里程达到10.8万km,二级及以上公路里程达到65万km,农村公路总里程达到390万km。由此可见,我国公路建设任务依然十分繁重。由于国产沥青质量差和数量缺乏,严重制约着公路沥青路面建设与发展,而交通量增长及车辆轴载增加又对路面承载力要求越来越高,半刚性基层沥青路面具有优良的工程性能(强度大、稳定性好、刚度大、板体性好,利于机械化施工等)和显著的经济效益,既满足了我国高等级公路建设快速发展的需求,又适应了现代交通发展的需求,而成为目前我国高等级公路的主要路面结构形式。可以预计,在今后的高等级公路建设中,半刚性基层沥青路面仍将是主要的路面结构形式,而水泥稳定碎石基层因其早期强度高、便于施工等特点,适应了公路建设快速发展的需要,必将在我国道路基层中占主导地位。

水泥稳定碎石基层虽然具有诸多优点,但是在建设使用过程中也遇到了一些棘手问题,其中最为突出的当属水泥稳定碎石基层收缩裂缝问题,影响着我国沥青路面耐久性。进入21世纪,随着国民经济持续高速增长,我国公路交通状况产生了明显变化,交通量增长很快,重载货车数量显著增加,超载车辆比较普遍,新交通状况下我国公路路面基层收缩裂缝问题更为严峻。多年来,国内许多单位都对水泥稳定碎石基层收缩裂缝及防治措施进行了研究,但始终未能得到较好地解决,也因此被国内绝大多数道路界同行们认为水泥稳定碎石基层开裂不可避免的。毫无疑问,水泥稳定碎石应具有足够力学特性以抵抗车辆荷载反复作用和良好抗裂性能以抵抗温湿循环作用。研究发现,水泥石具有比集料大得多的温缩和干缩系数,水泥稳定碎石抗裂性能很大程度上取决于水泥石多寡及其孔隙。一般来说,水泥石含量越大,水泥稳定碎石抗裂性能越差,力学强度越大;水泥石孔隙率越小,水泥稳定碎石抗裂性能与力学性能越好,而水泥石空隙率与级配类型、密实度和施工含水率有关。然而,传统水泥稳定碎石以强度为设计指标并以基层芯样完整性评价施工质量,使工程技术人员更加重视水泥稳定碎石力学强度,而忽视抗裂性能。重型击实方法和静压方法成型试件工程性质与现场钻芯试件工程性质的相关性平均不到36%,试验结果也使得工程技术人员陷入认识误区,认为提高水泥剂量是提高水泥稳定碎石强度和确保基层芯样完整性最有效也是唯一手段。顾此失彼,结果使得水泥稳定碎石基层具有很强抗疲劳断裂能力,但抗裂性能很差,易出现大量收缩裂缝,严重影响工程质量。这也就是为什么随着重载交通发展,水泥稳定碎石基层收缩裂缝越演越烈的原因。实际上,除水泥剂量之外,提高基层承载能力、防止基层疲劳断裂措施很多,如增加基层厚度、提高基层压实度、采用骨架密实级配等都是行之有效措施,且压实度提高和骨架密实级配,还有助于减少水泥石孔隙率、提高水泥稳定碎石抗裂性能。揭示水泥稳定碎石本质属性和内在规律,掌握水泥稳定碎石组成结构与力学强度、抗裂性能之间客观规律,结合荷载作用下路面力

学响应,提出防止疲劳断裂的水泥稳定碎石强度设计标准,并采取各种措施确保强度满足设计标准前提下,尽可能降低水泥剂量以提高抗裂性能,这是解决水泥稳定碎石基层疲劳断裂和收缩裂缝基本思路。鉴于此,结合目前施工机械水平和性能,研究能准确预测力学性能的水泥稳定碎石振动试验方法,无论在科研领域还是在工程实践中都具有指导意义。

近年来,国内学术和工程界已开始进行水泥稳定碎石振动试验方法研究,并随着 JTG D50—2006《公路沥青路面设计规范》中振动法出现,在全国范围内掀起水泥稳定碎石振动试验方法工程应用的新高潮,积累了大量工程实践经验,水泥稳定碎石基层工程质量也有所提高。随着工程实践和科研的不断深入,水泥稳定碎石振动试验方法在工程应用中也出现许多热点和难点问题,影响着水泥稳定碎石振动试验方法的应用效果,如水泥稳定碎石振动仪选型标准问题、所采用振动试验方法成型试件工程性质与现场钻芯试件工程性质的相关性、振动试验方法成型试件 7d 无侧限抗压强度远大于现行水泥稳定碎石强度设计标准问题、基于振动试验方法如何设计与施工水泥稳定碎石基层,等等。这些问题存在致使一些工程项目盲目简单地认为采用振动仪的试验方法就是振动法,结果事与愿违,使得设计与施工水泥稳定碎石工程质量不但没得到提高,甚至降低了,由此也影响水泥稳定碎石振动试验方法声誉。针对上述这些具体问题,作者查阅了大量国内外有关资料,发现国内尚无一本系统论述水泥稳定碎石振动试验方法及设计与施工技术方面的书籍。同时,作者先后与陕西省交通厅基本建设工程质量监督站、陕西省交通建设集团、河南省公路管理局、濮阳市公路管理局、浙江交建路桥工程公司、廊沧高速公路廊坊建设管理处等多家单位合作,研发了力学性能测试准确度达 93% 以上水泥稳定碎石垂直振动法,提出一整套基于垂直振动法抗裂型水泥稳定碎石设计与施工技术,已在陕西、河北、河南和浙江等地成功推广应用,效果良好,成果已获国家发明专利 2 项、省级科技进步二等奖 2 项。多年的科研及工程实践为垂直振动法水泥稳定碎石设计与施工技术的大规模应用及本书的撰写提供了坚实的理论基础,同时积累了丰富的素材和宝贵的工程经验。

本书以作者近年来的科研成果为基础,详细阐述了水泥稳定碎石垂直振动法及其可靠性,介绍了基于垂直振动法水泥稳定碎石力学特性及其路面结构设计参数,探讨了基于垂直振动法水泥稳定碎石设计参数对路面结构设计的影响,深入研究了水泥稳定碎石基于疲劳断裂的强度设计标准、基于抗裂的强嵌挤骨架密实级配和基于垂直振动法抗裂型水泥稳定碎石设计技术。在依托实体工程基础上,研究了基于垂直振动法抗裂型水泥稳定碎石施工技术,介绍实体工程应用效果和经济及社会效益。本书力求为广大同行读者呈献一本全面、系统地介绍基于振动法水泥稳定碎石设计与施工技术的著作,以期为我国公路交通事业的可持续发展尽一点微薄之力。

本书是科研合作单位及科研参与者共同努力所取得的成果结晶,在此谨向所有参加项目研究的单位和研究人员表示衷心的感谢!长安大学博士生导师戴经梁教授对写作大纲及书稿进行了多次详细审阅,并亲笔进行了修正、补充和润色,在此表示衷心的感谢!

本书的出版,得到教育部新世纪优秀人才支持计划、交通运输部行业联合科技攻关项目和陕西交通科技项目经费联合资助,谨此致以衷心的感谢。本书引用了不限于本书已列出参考文献中有关内容,对被引用文献的原作者表示感谢。

限于作者水平,书中不当之处在所难免,敬请同行专家不吝赐教,不胜感激。

著 者

2011 年 10 月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 水泥稳定碎石基层裂缝机理及其影响因素	1
第二节 水泥稳定碎石设计与施工技术现状	3
第三节 垂直振动法水泥稳定碎石设计与施工技术	9
第二章 振动击实仪的选型标准	11
第一节 振动击实仪构造	11
第二节 VVTM 动态响应及振动参数	13
第三节 VVTM 选型标准	19
第三章 垂直振动法(VTM)及压实标准	31
第一节 垂直振动击实法及压实标准	31
第二节 试件垂直振动成型法及其可靠性	37
第三节 垂直振动法与旧方法的比较	40
第四章 基于 VTM 水泥稳定碎石力学特性	50
第一节 力学强度形成机理与试验方案	50
第二节 力学强度及影响因素	52
第三节 回弹模量及影响因素	67
第四节 疲劳特性及影响因素	75
第五节 力学性能之间规律	87
第五章 基于 VTM 水泥稳定碎石设计参数及其对路面设计影响	91
第一节 基于 VTM 水泥稳定碎石设计参数	91
第二节 VTM 法与现行规范设计参数的比较	96
第三节 VTM 法与规范设计参数对路面设计的影响	97
第六章 基于 VTM 抗裂型水泥稳定碎石设计技术	102
第一节 控制疲劳断裂的水泥稳定碎石强度设计标准	102
第二节 抗裂型水泥稳定碎石强嵌挤骨架密实级配	111
第三节 基于 VTM 抗裂型水泥稳定碎石设计方法	121
第七章 基于 VTM 水泥稳定碎石施工技术	126
第一节 施工组织与准备	126
第二节 施工工艺	130

第三节 施工质量管理与验收.....	135
第八章 工程应用和经济及社会效益.....	138
第一节 工程应用.....	138
第二节 经济及社会效益.....	143
参考文献.....	144

第一章 绪 论

从 20 世纪 70 年代中期,我国公路建设中开始使用水泥稳定材料基层,到 80 年代初逐步推广应用。从 20 世纪 90 年代初开始,水泥稳定碎石因其早期强度高、便于施工等特点,适应了公路建设快速发展的需要,而成为我国使用最为广泛的公路基层材料,据不完全统计,建成的高等级公路中 75% 以上采用水泥稳定碎石基层。而经过“六五”、“七五”和“八五”国家重点科技攻关项目的研究,逐渐形成的半刚性基层沥青路面结构设计与施工成套技术支撑了我国近 20 多年来高等级公路建设。然而,随着工程实践深入,也逐渐发现无论是我国南方还是北方,水泥稳定碎石基层沥青路面的开裂现象都比较普遍,这也一直困扰着我国道路工程界,影响着我国沥青路面耐久性,尽管对此国内外也进行了大量相关研究,但始终未能得到较好地解决。进入 21 世纪,随着国民经济持续高速增长,我国公路交通状况产生了明显变化,交通量增长很快,重载货车数量显著增加,超载车辆比较普遍,新交通状况对路面基层承载能力提出更高要求,这进一步加剧水泥稳定碎石基层收缩开裂。显然,目前的水泥稳定碎石设计与施工技术,已经跟不上公路建设和交通发展的需要,迫切需要更新水泥稳定碎石设计与施工技术,以提高水泥稳定碎石工程质量。本章分析水泥稳定碎石设计与施工技术现状,论述基于振动法水泥稳定碎石设计与施工技术的特点。

第一节 水泥稳定碎石基层裂缝机理及其影响因素

一、裂缝类型及其机理

裂缝是水泥稳定碎石基层工程实践中遇到的主要问题。在交通荷载作用下,这种裂缝极易扩展到面层形成沥青路面反射裂缝,加速路面的破坏,缩短路面使用寿命。

影响水泥稳定碎石基层开裂的原因和裂缝的形式是多种多样的。但就水泥稳定碎石基层开裂的主要原因而论,可分为两大类,即荷载型裂缝和非荷载型裂缝。

荷载型裂缝主要由于交通荷载作用而产生的疲劳裂缝。在交通荷载作用下,水泥稳定碎石基层底部产生拉应力,当此拉应力超过水泥稳定碎石基层材料的抗拉强度,则水泥稳定碎石基层底部就会产生开裂。在行车荷载反复作用下,底部裂缝会逐渐扩展到上部,并使沥青路面也开裂破坏。

非荷载型裂缝主要表现为干缩裂缝和温缩裂缝。如果能保持水泥稳定碎石基层在铺筑沥青面层前不开裂,则面层铺筑后其失水变得相当困难,一般情况下水泥稳定碎石基层不会先于沥青面层产生干缩裂缝。因此,非荷载裂缝主要是温度裂缝。温度裂缝包括低温收缩裂缝和温度疲劳裂缝。低温收缩裂缝是由于基层材料随着温度下降而收缩,而基层收缩受到路面结构的约束而产生拉应力,当基层材料中的拉应力或拉应变一旦超过材料的抗拉强度或极限抗

拉应变就会引起基层的开裂。由于一般道路基层宽度都不很大,收缩所受约束小,所以温度收缩裂缝主要是横向的。而温度疲劳裂缝主要发生在太阳照射强烈、日温差大的地区。这种地区,基层白天温度与夜间温度之差相当大,在基层中产生较大温度应力,这种温度应力日复一日地反复作用在基层中,使基层产生疲劳开裂,由此产生的裂缝称为温度疲劳裂缝。

二、裂缝的影响因素

影响荷载型裂缝的外因主要有车辆荷载大小及其作用次数,内因主要是水泥稳定碎石力学性能及其路面结构与厚度。影响温缩裂缝的外因主要指外界温度变化,内因是水泥稳定碎石抗裂性能。因此,水泥稳定碎石基层力学性能和抗裂性能是影响裂缝的关键因素,足够的力学性能是确保水泥稳定碎石基层不产生荷载型裂缝前提,而良好抗裂性能是减少水泥稳定碎石基层非荷载型裂缝的关键。下面就水泥稳定碎石技术活动对其力学性能和抗裂性能进行分析。

1. 室内试验方法的影响

室内试验方法包括:水泥稳定碎石最大干密度和最佳含水率的确定方法、供物理力学性能测试用试件的成型方法(影响着矿料排列方式及其成型后试件级配),其决定了水泥稳定碎石试件结构,进而影响到水泥稳定碎石力学性能和抗裂性能室内测试结果。因此,室内试验方法能否充分模拟施工过程和实际压实效果,直接影响试验结果准确性和可靠性,进而影响到工程技术人员能否客观、真实地掌握水泥稳定碎石本质属性和内在规律,并对材料设计方法作出创新。同时,室内试验结果也是现场施工质量控制依据。

2. 材料组成与设计的影响

水泥稳定碎石力学性能和抗裂性能,取决于水泥稳定碎石组成与结构。水泥稳定碎石组成包括:原材料、矿料级配和水泥剂量。而水泥稳定碎石结构主要取决于最大干密度和最佳含水率、成型方式。在材料组成设计中,应采用能模拟现场实际效果的室内试验方法,研究水泥稳定碎石的力学性能、抗裂性能和施工性能等及其相关影响因素,然后确定水泥稳定碎石材料组成、最大干密度和最佳含水率,使其设计水泥稳定碎石具有抵抗交通荷载和环境因素反复作用而不破坏的能力。

3. 设计参数的影响

路面结构设计过程,应考虑基层层底弯拉应力、荷载作用次数和水泥稳定碎石材料抗拉强度及抗拉强度结构系数,根据基层层底弯拉应力不超过水泥稳定碎石容许抗拉强度进行路面结构厚度设计。水泥稳定碎石基层层底弯拉应力与荷载大小、结构层厚度和材料设计模量有关;水泥稳定碎石容许抗拉强度是指抗拉强度与抗拉强度结构系数比值,抗拉强度结构系数取决于水泥稳定碎石疲劳特性及荷载作用次数。因此,水泥稳定碎石路面结构设计参数(设计模量、抗拉强度和抗拉强度结构系数)直接影响路面设计厚度,路面设计厚度又决定水泥稳定碎石基层荷载型裂缝。水泥稳定碎石组成结构决定水泥稳定碎石设计模量、抗拉强度和抗拉强度结构系数,而水泥稳定碎石组成结构取决于设计与施工技术。

4. 施工质量控制的影响

施工前,矿料级配、水泥剂量、施工含水率的精确计量是前提;施工过程中,混合料离析控制和压实控制是保证工程质量的关键;施工结束后,科学、合理地养生与交通管制是基本外部环境。

第二节 水泥稳定碎石设计与施工技术现状

一、室内试验方法现状

最大干密度 ρ_{dmax} 和最佳含水率 w_0 是水泥稳定碎石材料设计的基本参数,也是施工质量控制的重要参数。目前广泛采用(JTG E51—2009)《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》中的重型击实法(Heavy Compaction Test Method,简称 HCM)。而供物理力学测试用试件则广泛采用(JTG E51—2009)《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》中的静力压实法(Static Pressure Producing Specimen Method,简称 SPSM)。

1. 重型击实试验方法

重型击实试验法建立于 20 世纪 80 年代后期,与当时压实机械相适应,也满足当时交通的需要,在我国已有 30 多年应用历史,也取得了相当成功的应用经验,具有较为广泛的应用基础和适用性。近年来,随着施工机械水平提高和现代交通发展,重型击实试验方法显示出适应性。

(1) 重型击实方法的规律与特点

重型击实试验的规律及特点见表 1-2,试验采用柞水石灰岩碎石,矿料级配见表 1-1。由表 1-2 和图 1-1 可知,骨架密实型水泥稳定碎石干密度普遍大于悬浮密实型水泥稳定碎石,这间接体现出骨架密实级配优越性;不论是骨架密实型还是悬浮密实型水泥稳定碎石,随着水泥剂量增大,水泥稳定碎石干密度都有所增大,显示出水泥具有填充空隙作用。

矿料级配 表 1-1

级配类型	下列筛孔(mm)通过质量百分率(%)						
	31.5	19.0	9.5	4.75	2.36	0.6	0.075
悬浮密实型(XM)	100	93.5	67.0	39.0	26.0	15.0	3.5
骨架密实型(GM)	100	67.0	47.0	33.0	23.0	14.0	3.0

重型击实试验结果 表 1-2

水泥剂量 $P_s(\%)$	拌和含水率 (%)	XM			GM		
		测试含水率 (%)	含水率变化量 (%)	干密度 (g/cm^3)	测试含水率 (%)	含水率变化量 (%)	干密度 (g/cm^3)
3.0	4.5	4.3	0.2	2.33	4.3	0.2	2.35
	5.0	4.6	0.4	2.35	4.7	0.3	2.37
	5.5	5.0	0.5	2.37	4.9	0.6	2.38
	6.0	5.3	0.7	2.36	5.2	0.8	2.37
	6.5	5.6	0.9	2.34	5.4	1.1	2.36
4.0	4.5	4.3	0.2	2.33	4.4	0.1	2.35
	5.0	4.8	0.2	2.36	4.7	0.3	2.37
	5.5	5.1	0.4	2.37	5.0	0.5	2.38
	6.0	5.3	0.7	2.36	5.4	0.6	2.37
	6.5	5.6	0.9	2.35	5.7	0.8	2.36

续上表

水泥剂量 P_s (%)	拌和含水率 (%)	XM			GM		
		测试含水率 (%)	含水率变化量 (%)	干密度 (g/cm^3)	测试含水率 (%)	含水率变化量 (%)	干密度 (g/cm^3)
5.0	4.5	4.4	0.1	2.34	4.3	0.2	2.35
	5.0	4.9	0.2	2.36	4.7	0.3	2.38
	5.5	5.2	0.3	2.38	5.0	0.5	2.39
	6.0	5.4	0.6	2.37	5.4	0.6	2.38
	6.5	5.7	0.8	2.35	5.7	0.8	2.36

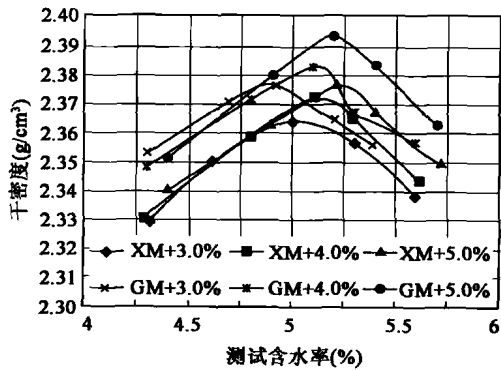


图 1-1 水泥稳定碎石重型击实试验结果

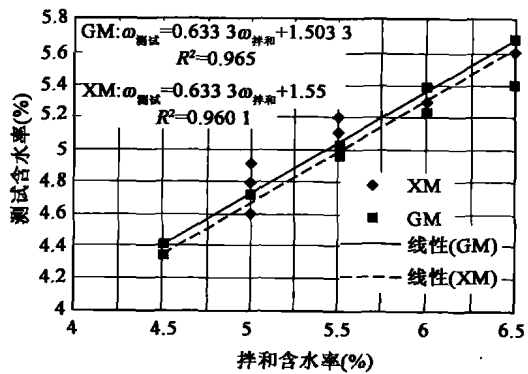


图 1-2 拌和含水率和测试含水率之间关系

如图 1-2 所示,测试含水率普遍比拌和含水率小,且随拌和含水率增大,拌和含水率和测试含水率之差 Δw 也增大;骨架密实级配水泥稳定碎石由于粗集料用量较多、细集料用量较少,总体比表面相对较小,润滑作用所需含水率也小,所以最佳含水率相对也小,并表现出 Δw 大于悬浮密实型级配。根据图 1-2 中测试含水率和拌和含水率之间回归关系,可得拌和含水率与测试含水率之差 Δw 与拌和含水率之间关系:

骨架密实型水泥稳定碎石:

$$\Delta w = 0.3667 \cdot w_{\text{拌和}} - 1.50 \quad (1-1)$$

悬浮密实型水泥稳定碎石:

$$\Delta w = 0.3667 \cdot w_{\text{拌和}} - 1.55 \quad (1-2)$$

(2) 重型击实试验方法的不适应性

近 10 多年来,压路机一般已增加到 20t 以上,且还有更重的轮胎压路机以及效能很高的振动压路机。因此,用重型击实试验法得出的最大干密度往往较施工现场实际能达到的干密度小,工程实践中出现压实度易超百现象。根据模拟试验原理及压实规律,重型击实方法不适应性表现以下几方面。

① 重型击实方式不能模拟现场振碾机理,室内击实法是通过施加冲击荷载对被压材料进行压实的,而现场振动压实是通过高频振动作用使材料液化压密的,致使试件矿料颗粒排列方式与实际碾压成型基层矿料排列方式有差异。

② 重型击实功已落后与生产实际,重型击实功是根据 20 世纪 80 年代末普遍使用 12 ~ 15t 压路机提出的,而目前公路基层压实设备普遍采用 20t 以上可调频调幅振动压路机,致使重型

击实法确定 ρ_{dmax} 作为标准干密度用于生产控制,现场压实度易超百而忽视对基层充分碾压。

③含水率确定依据与实际施工不符。含水率是基层材料所含水分占干料的质量百分数。首先,在不断击实作用下击实筒内颗粒逐渐靠拢,颗粒孔隙间水分随着颗粒靠拢而逐渐被挤出,这样击实完毕后试料含水率比击实开始时拌和含水率要小;其次,击实完毕后,混合料烘干 8~12h 测试含水率过程中水化反应又消耗试样中部分水分,使得烘干后含水率又比击实后含水率要小。即重型击实试验开始时拌和含水率比试验结束烘干法测试含水率大,且拌和含水率越大,试验前后试样含水率变化幅度也越大,如试验时水泥稳定碎石拌和含水率 6.0%,而烘干后含水率为 5.3% 左右。而工程实际施工过程中基层材料从碾压开始到碾压结束过程中,基层材料含水率是基本不变的,当含水率过大时,由于水分无处可挤而通常出现工程中“弹簧土”现象,反而影响压实效果。

④模拟效果差、试验重现性差和操作繁杂。首先,重型击实试验分 3 层装试样击实,这与实际现场生产过程中不吻合,模拟施工效果差;其次,分层装料及分层击实厚度、击实后拉毛处理以及击实后对试样表面整平处理会因试验人员的不同而影响击实效果,甚至同一试验员不同时间所做试验结果也存在较大差异,试验重现性差、试验结果离散性较大。

(3) 重型击实试验方法的准确度

重型击实方法确定最大干密度 $\rho_{dmax(H)}$ 与现有碾压设备下现场碾压基层所能达到的最大干密度 $\rho_{dmax(X)}$ 见表 1-3。表中准确度是指用试验方法测定的结果与真实值或参考值之比, S 是指 δ_h 的标准差。表中数据表明,采用重型击实试验方法准确度为 95.8%~98.7%,平均 96.9%,标准差为 0.9%,说明重型击实试验方法已不适应当前压实机械,不能较好地指导生产。

HCM 试验结果准确性

表 1-3

项 目 名 称	标 段	现场参考值	HCM 测试值	准确度 $\delta_h = \rho_{dmax(X)} / \rho_{dmax(H)} \times 100$		
		$\rho_{dmax(X)} (g/cm^3)$	$\rho_{dmax(H)} (g/cm^3)$	$\delta_h (\%)$	$\bar{\delta}_h (\%)$	$S (\%)$
柞小高速公路	32	2.406	2.331	96.9	96.9	0.90
	33	2.419	2.338	96.7		
	34	2.437	2.369	97.2		
	35	2.441	2.378	97.4		
宛坪高速公路	2	2.454	2.421	98.7		
	3	2.510	2.432	96.9		
	4	2.470	2.422	98.1		
	5	2.497	2.403	96.2		
	6	2.519	2.414	95.8		
	7	2.566	2.461	95.9		
	8	2.541	2.452	96.5		
	9	2.557	2.454	96.0		
	10	2.424	2.383	98.3		
	11	2.523	2.442	96.8		

2. 静压成型试件方法

供分析测试用的样品,通常称试件或试样,其制作或成型是水泥稳定碎石材料设计中的关

键环节。制作的试件是否具有真实性、可靠性和代表性,直接关系到水泥稳定碎石性能分析结果和由此得出设计结论是否正确的一个先决条件。随着压实机械水平提高,静力压实制备试件方法已显示出不适用性。

(1)静压法成型试件的规律与特点

重型击实试验方法确定的最大干密度和最佳含水率,见表 1-4。静力压实成型试件成型前后,含水率变化规律及级配变化规律,分别见表 1-5、表 1-6。

重型击实试验法确定的最大干密度和最佳含水率 表 1-4

级配类型	GM			XM		
P_s (%)	3	4	5	3	4	5
w_0 (%)	4.9	5.0	5.0	5.0	5.1	5.2
ρ_{dmax} (g/cm ³)	2.38	2.38	2.39	2.37	2.37	2.38

静压法成型前后含水率变化规律 表 1-5

水泥 剂量 (%)	GM				XM			
	最佳含水率 (%)	成型后 含水率 (%)	含水率 差值 (%)	含水率 损失率 (%)	最佳 含水率 (%)	成型后 含水率 (%)	含水率 差值 (%)	含水率 损失率 (%)
3	4.9	4.1	0.8	16.3	5.0	4.4	0.6	12.0
4	5.0	4.3	0.7	14.0	5.1	4.3	0.8	15.7
5	5.0	4.4	0.6	12.0	5.2	4.3	0.9	17.3

静压法成型前后级配变化规律 表 1-6

级配类型	水泥剂量 P_s (%)	下列筛孔 (mm) 通过质量百分率 (%)						
		31.5	19.0	9.5	4.75	2.36	0.6	0.075
GM	3	100	83.5	55.7	40.1	28	18.1	7.2
	4	100	83.5	56.1	39.7	28.3	17.3	7.0
	5	100	84.2	56.0	39.8	29.0	17.6	7.6
	原级配	100	74	47	33	23	14	3.0
XM	3	100	96.0	72.3	49.1	34.8	19.2	7.0
	4	100	94.9	73.4	51.2	33.8	19.2	7.3
	5	100	94.8	72.2	50.0	34.0	18.0	5.8
	原级配	100	93.5	67	39	26	15	3.5

表 1-5 数据表明,静压法成型试件的成型后实际含水率比成型前拌和含水率小,含水率损失率约 12% ~ 16%。拌和含水率采用重型击实法确定的最佳含水率,这说明静力压实方法和重型击实方法不匹配,重型击实试验方法确定最佳含水率偏大;而成型后含水率的损失也必将导致试件内部实际水泥剂量变小,最终影响试件力学强度。从表 1-6 和图 1-3 可以看出,静压法成型试件对混合料级配影响较为显著,如骨架密实级配在 19mm 和 9.5mm 两个粒径上的通过率都有较大的增加,表明有粗集料被压碎,从而影响骨架结构的形成并导致力学强度的下降。

(2)静压成型试件方法的不适应性

其不适应性表现在下列几方面:

①重型击实方式与静力压实方式不相匹配。

②静力压实法制备试件与实际振动碾压成型(底)基层不符,制备的试件组成结构与实际碾压成型的(底)基层结构不符。

③试件制备过程中粗集料压碎情况较为严重,制备的试件级配与实际碾压成型的(底)基层级配不符。

④试件制备过程中含水率损失情况较为严重,含水率损失导致试件实际水泥剂量降低,这与现场实际碾压成型的(底)基层含水率和水泥剂量不符。

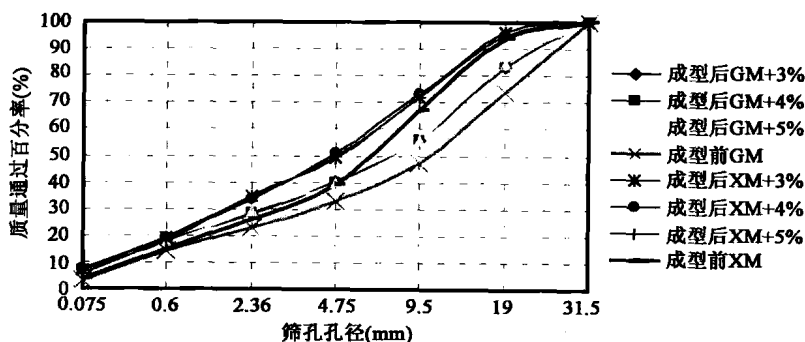


图 1-3 成型试件前后级配变化情况

(3) 静压成型试件方法的准确度

现场芯样、静压成型法成型试件的 7d 无侧限抗压强度试验结果见表 1-7。表中数据表明,静压法成型的试件工程性质与现场钻芯试件工程性质的相关性较差,相关性平均不到 36%,不能准确预测水泥稳定碎石的力学性能。

SPSM 试验结果准确性

表 1-7

项目名称	标段	现场芯样测试值	SPSM 试件测试值	准确度 $\delta_R = \bar{R}_{0.95(S)} / \bar{R}_{0.95(X)} \times 100$		
		$\bar{R}_{0.95(X)}$ (MPa)	$\bar{R}_{0.95(S)}$	δ_R (%)	$\bar{\delta}_R$ (%)	S (%)
柞小高速公路	32	6.1	1.7	27.8	35.6	8.2
	33	7.6	2.1	27.6		
	34	7.9	1.7	21.4		
	35	9.9	2.0	20.2		
宛坪高速公路	2	9.0	3.8	42.3		
	3	9.2	3.3	35.9		
	4	9.1	3.3	36.4		
	5	8.5	3.4	39.9		
	6	8.7	4.0	46.1		
	7	8.4	3.4	40.3		
	8	8.5	3.6	42.3		
	9	8.7	3.6	41.3		
	10	8.8	3.7	42.2		
	11	8.8	3.1	35.2		

二、水泥稳定碎石设计与施工技术

水泥稳定碎石材料设计目的是确定矿料级配、水泥剂量、最大干密度和最佳含水率,使得水泥稳定碎石具有抵抗荷载和环境破坏的能力。目前,我国的水泥稳定碎石设计方法是:采用重型击实试验方法确定最大干密度和最佳含水率、采用静力压实法按重型击实法确定 ρ_{dmax} 、 w_0 和规定压实度制备 $\phi 15\text{cm} \times h 15\text{cm}$ 圆柱体试件,评价试件在规定温度条件下保湿养护 6d、浸水 1d 后无侧限抗压强度是否满足强度标准,在此基础上进行材料组成设计。

(1) 试验方法的影响

试验方法直接影响到水泥稳定碎石试件结构(包括最大干密度、最佳含水率和矿料排列方式),进而影响水泥稳定碎石力学强度室内测试结果和材料组成设计结果。材料组成设计中,应采用能模拟现场实际效果的室内试验方法。然而,实际采用重型击实方法与静压法成型方法,与工程实际相关性较差,致使无法精确掌握水泥稳定碎石组成结构与性能之间的客观规律,而影响材料设计。工程实践表明,采用重型击实试验方法确定最大干密度作为标准干密度,20t 以上振动压路机振碾 2~3 遍,即可满足压实度要求,甚至出现超百现象。实际上 20t 以上振动压路机振碾 6 遍以上,现场水泥稳定碎石密实度才能达到最大;与振碾 2~3 遍相比,压实度能提高 3%~5%。而已有研究表明,压实度提高 1%,水泥稳定碎石力学强度平均可提高 11% 左右。静压法成型试件因含水率损失率在 12%~16%,而导致试件内部实际水泥剂量比拌和加入时水泥剂量至少降低了 10% 以上,且试件内部粗集料被压碎、排列方式不同于实际等,导致设计水泥剂量偏高(实际采用水泥剂量普遍在 5%~6%),而影响水泥稳定碎石抗裂性能,使得不少工程水泥稳定碎石基层在面层铺筑前出现较多裂缝现象。更为糟糕的是,工程技术人员对此现象司空见惯,因试验方法问题也无法从根源上去寻找问题所在以及解决措施。

(2) 设计指标的影响

设计指标选取应能控制水泥稳定碎石荷载型裂缝和环境型裂缝。受材料抗裂性能测试手段制约,目前我国水泥稳定碎石采用抗压强度为设计指标,并没有考虑抗裂性能要求。实际上,路面力学分析表明,运营期间路面结构在荷载作用下基层底部拉应力水平为 0.2~0.4MPa,而水泥稳定碎石弯拉强度普遍在 1.0MPa 以上,运营期荷载作用不足以引起路面基层产生疲劳断裂,大量工程实践也证明了这一点。但施工期间路面尚未完全成型且强度也未完全形成,较薄路面结构层和较低强度使得基层在施工车辆反复作用下容易产生疲劳断裂。因此,确保碾压成型水泥稳定碎石基层有足够养生时间和环境,使其具有足够早期强度以抵抗施工车辆荷载反复作用,这是防止水泥稳定碎石基层疲劳断裂关键。通常水泥稳定碎石基层养生 7~10d 以上,即可防止施工车辆产生疲劳断裂。也就是说,水泥稳定碎石基层承载能力不是问题,而更多的是水泥稳定碎石基层收缩裂缝问题。另外,强度标准制订依据是确保水泥稳定碎石基层有足够力学强度抵抗交通荷载反复作用而不产生疲劳断裂,显然与路面结构厚度有关,而目前水泥稳定碎石强度标准并没考虑到这一点。

在室内试验方法确定情况下,水泥稳定碎石力学强度和抗裂性能受水泥剂量影响显著,力学强度随水泥剂量增大而增大,而抗裂性能却随水泥剂量增大而降低。以力学强度为指标水泥稳定碎石设计方法中,水泥剂量选取以力学强度为依据,而忽略对抗裂性能的考虑,使得设

计的水泥剂量普遍较高,结果尽管控制住荷载型疲劳裂缝的发生,但无法控制温度裂缝的发生,并且更为严重。

综上所述,尽管我国公路路面基层施工机械水平和性能有了大幅度提升,但目前我国的水泥稳定碎石设计与施工技术基本上停留 20 世纪 80 年代末水平,机械优异性能并没能得到充分发挥。同时,现有试验方法和设计与施工技术制约研究深度和广度,无法有效揭示水泥稳定碎石组成结构与性能之间客观规律,也误导工程技术人员对水泥稳定碎石的认识。如,对水泥稳定碎石基层在沥青面层铺筑前大量出现裂缝现象司空见惯;水泥剂量应达到 5%~6% 以上几乎成为共识;施工后的水泥稳定碎石基层表观密实、特别是光滑(级配不良)事实上已成为水泥稳定碎石基层质量控制的重要标准;工程中为达到设计强度指标及保证路面芯样完整,提高水泥剂量几乎成为最有效的手段;现场芯样无侧限抗压强度往往远大于室内静压法成型试件强度的原因很少被考虑;现有压实设备下,无需对施工工艺严格控制也能达到较高的压实度(压实度超百现象普遍存在,其实质是重型击实法确定的压实度标准偏低)已被接受,但正是在压实度容易达到的情况下,基层的压实反而被忽视等。因此,基于重型击实试验法和静压成型试件方法的水泥稳定碎石设计与施工技术已落后于生产实际,跟不上交通发展和公路建设的需要。

第三节 垂直振动法水泥稳定碎石设计与施工技术

重型击实试验方法与静压试件制备方法建立于 20 世纪 80 年代后期,那时的筑路机械相对较落后,压路机吨位一般在 12~15t 左右;汽车也主要是轻型的,载重 8t 以上算是重型的,且交通量也不大。因此,与当时压实机械相适应,满足当时交通的需要,也取得了相当成功的应用经验。随着工程实践的不断深入,尤其是近 10 多年来,水泥稳定碎石工程实践中暴露出一些新问题,如压实度超百、收缩裂缝严重等现象,而影响基层质量。与此同时,进入 21 世纪,随着国民经济持续高速增长,我国公路交通状况产生了明显变化,交通量增长很快,重载货车数量显著增加,超载车辆比较普遍,新交通状况对我国路面基层又进一步提出了更高的技术要求。

为了解决水泥稳定碎石试验方法、设计与施工技术问题,减少水泥稳定碎石基层裂缝,提高工程质量。近年来,国内学术和工程界已开始进行水泥稳定碎石振动试验方法研究,并随着 JTG D50—2006《公路沥青路面设计规范》中振动法出现,在全国范围内掀起水泥稳定碎石振动试验方法工程应用的新高潮,也积累了大量工程实践经验,水泥稳定碎石基层工程质量也得到一定提高。然而,随着工程实践和科研不断深入,水泥稳定碎石振动试验方法工程应用中,也出现许多热点和难点问题,影响着水泥稳定碎石振动试验方法应用效果。如水泥稳定碎石振动仪选型标准问题、所采用振动试验方法成型试件工程性质与现场钻芯试件工程性质的相关性问题、振动试验方法成型试件 7d 无侧限抗压强度远大于现行水泥稳定碎石强度设计标准问题、基于振动试验方法如何设计与施工水泥稳定碎石基层,等等。这些问题存在致使一些工程项目盲目简单地认为采用振动仪的试验方法就是振动法,结果事与愿违,使得设计与施工水泥稳定碎石工程质量不但没得到提高反而降低了,也由此影响水泥稳定碎石振动试验方法声誉。

针对上述这些具体问题,近年来作者先后与陕西省交通厅基本建设工程质量监督站、陕西省交通建设集团、河南省公路管理局、河南省濮阳市公路管理局、浙江交建路桥工程公司等多家单位合作,研制能较好模拟实际碾压工况和效果、力学性能测试准确度达 93% 以上水泥稳定碎石垂直振动法(VTM);基于 VTM 研究水泥稳定碎石力学特性和疲劳特性规律及其影响因素,揭示水泥稳定碎石组成结构与性能之间客观规律,提出水泥稳定碎石路面结构准确力学计算参数;研究基于 VTM 法的水泥稳定碎石材料设计标准和不易离析的强嵌挤骨架密实级配,对水泥稳定碎石材料设计方法进行创新,提出基于 VTM 法抗裂型水泥稳定碎石设计技术;并针对水泥稳定碎石 VTM 法设计特点,提出水泥稳定碎石施工技术。最终,形成基于 VTM 法的水泥稳定碎石设计与施工技术。

基于 VTM 法的水泥稳定碎石设计与施工技术其抗裂核心思想是:在不增加施工难度条件下,通过降低水泥剂量、提高压实度和采取强嵌挤骨架密实级配以及一些简单防离析等措施,提高水泥稳定碎石工程质量尤其是抗裂性能,缓解甚至解决传统方法设计与施工水泥稳定碎石易开裂的技术问题。该技术总体达到国际水平,并在陕西、河南、河北、浙江等地公路上推广应用已有 5 年,应用效果良好,至今未发现水泥稳定碎石基层收缩裂缝。