

水泥石灰粉煤灰稳定碎石 性能研究

陈渊召 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

水泥石灰粉煤灰稳定碎石 性能研究

陈渊召 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

配合比合理的基层材料并掺加一定剂量的粉煤灰或膨胀剂,其早期强度高、收缩系数小、抗裂性能好、整体性能较均匀。从集料级配和结合料种类、剂量等方面入手,本书提出了半刚性基层材料抗裂配合比设计方法,并结合工程地区材料供应状况,从混合料的配合比设计、力学性能、抗裂性能、冲刷性能、疲劳特性等方面对其进行了系统研究,并以此验证了半刚性基层材料防裂配合比设计方法的合理性与适用性,提出了采用综合抗裂指数作为半刚性基层材料抗裂设计的控制指标。在研究半刚性基层材料路用性能的基础上,本书运用有限元软件对半刚性基层沥青路面典型结构的温度场和温度应力进行了数值模拟,对比研究了不同半刚性基层材料应用于基层时,其内部温度应力的变化规律,从结构和力学的角度对半刚性基层材料抗裂性能进行了研究。本书推导了半刚性层收缩应力的计算公式,对影响最大收缩应力的各种因素进行了分析,验证了半刚性层的开裂规律,并对半刚性层的温度收缩裂缝进行了预估,得到了温缩裂缝间距与宽度的近似计算公式。

图书在版编目(CIP)数据

水泥石灰粉煤灰稳定碎石性能研究 / 陈渊召著. --
北京:中国水利水电出版社, 2016. 12
ISBN 978-7-5170-5057-5

I. ①水… II. ①陈… III. ①碎石—路面基层—研究
IV. ①U416.214

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第317715号

书 名	水泥石灰粉煤灰稳定碎石性能研究 SHUINI SHIHUI FENMEIHUI WENDING SUISHI XINGNENG YANJIU
作 者	陈渊召 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京京华虎彩印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 12印张 285千字
版 次	2016年12月第1版 2016年12月第1次印刷
定 价	35.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

随着国民经济的发展,公路交通量的增长和重载车辆的增加已成必然,为了适应这一发展趋势,以无机结合料稳定粒料类为基层的半刚性基层沥青路面被大量应用于高等级公路。这种半刚性基层材料路面在力学性能上,明显优于我国过去用粒料基层、底基层的沥青路面。本书保留石灰粉煤灰稳定碎石在路面基层中表现出的优良路用性能,通过掺加一定量水泥,即对水泥石灰粉煤灰稳定碎石进行研究,充分挖掘水泥石灰粉煤灰稳定碎石在道路基层应用中表现出污染小、造价低、强度高的潜力,提出水泥石灰粉煤灰稳定碎石基层材料配合比设计、基层设计参数、基层施工工艺、基层施工质量控制标准等技术。

本书提出了半刚性基层材料抗裂配合比设计方法,从混合料的配合比设计、力学性能、抗裂性能、冲刷性能、疲劳特性等方面进行了系统研究。提出了采用综合抗裂指数作为半刚性基层材料抗裂设计的控制指标。对半刚性基层沥青路面典型结构的温度场和温度应力进行了数值模拟,对比研究了不同半刚性基层材料应用于基层时,其内部温度应力的变化规律,从结构和力学的角度对半刚性基层材料抗裂性能进行了研究。推导了半刚性层收缩应力的计算公式,对影响最大收缩应力的各种因素进行了分析,验证了半刚性层的开裂规律;并对半刚性层的温度收缩裂缝进行了预估,得到了温缩裂缝间距与宽度的近似计算公式。

本书共分10章,第1章分析了水泥石灰粉煤灰稳定碎石的国内外研究现状;第2章进行了沿线路用材料性能及交通状况调查分析;第3章深入研究了水泥粉煤灰石灰化学反应机理;第4章进行了水泥石灰粉煤灰稳定碎石基层材料配合比研究;第5章系统分析了水泥石灰粉煤灰稳定碎石基层材料收缩性能;第6章进行了水泥石灰粉煤灰稳定碎石基层材料路用性能研究;第7章分析确定了水泥石灰粉煤灰稳定碎石基层设计参数研究;第8章进行了试验路铺筑及施工工艺研究;第9章深入研究了水泥石灰粉煤灰稳定碎石基层施工质量控制标准;第10章提出了主要研究结论。

全书由华北水利水电大学陈渊召写作完成。本书依托“河南省高等学校重点科研项目计划《基于三维细观结构与数值模拟的橡胶颗粒沥青混合料除

冰机理》(13A580707)和横向科研项目《南水北调中线二期总干渠陶岔—沙河南段方城段》”。全书可供公路设计、施工、研究人员及相关院校师生参考使用。

由于作者水平有限,如有不妥之处,恳请读者批评指正。

作者

2016年12月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究目的和意义	1
1.2 国内外研究概况	4
1.3 主要研究内容及技术路线	7
第 2 章 沿线路用材料性能及交通状况调查	9
2.1 工程简介	9
2.2 沿线主要路用材料性能调查研究	11
2.3 交通状况调查分析	13
2.4 水泥石灰粉煤灰稳定碎石基层路面结构调查分析	16
2.5 本章小结	17
第 3 章 水泥粉煤灰石灰化学反应机理研究	19
3.1 水泥石灰粉煤灰稳定碎石基层强度形成机理研究	19
3.2 粉煤灰对水泥水化的影响研究	19
3.3 水泥对火山灰反应的影响研究	25
3.4 石灰对火山灰反应的影响研究	29
3.5 水泥石灰粉煤灰系统水化研究	31
3.6 微观结构分析	35
3.7 本章小结	46
第 4 章 水泥石灰粉煤灰稳定碎石基层材料配合比研究	48
4.1 原材料性质分析	48
4.2 水泥石灰粉煤灰稳定碎石集料级配范围	50
4.3 水泥石灰粉煤灰稳定碎石配合比组成与分析研究	56
4.4 水泥石灰粉煤灰稳定碎石抗压强度与水泥掺量关系研究	63
4.5 本章小结	68
第 5 章 水泥石灰粉煤灰稳定碎石基层材料收缩性能研究	70
5.1 水泥石灰粉煤灰稳定碎石基层材料收缩性能影响因素	70

5.2	水泥石灰粉煤灰稳定碎石基层材料收缩机理研究	72
5.3	水泥石灰粉煤灰稳定碎石基层材料收缩性能试验研究	77
5.4	水泥石灰粉煤灰稳定碎石基层材料抗裂性能分析	88
5.5	水泥石灰粉煤灰稳定碎石基层材料快速养生研究	93
5.6	本章小结	97
第6章	水泥石灰粉煤灰稳定碎石基层材料路用性能研究	98
6.1	水泥石灰粉煤灰稳定碎石基层材料力学性能研究	98
6.2	水泥石灰粉煤灰稳定碎石基层材料稳定性能研究	109
6.3	水泥石灰粉煤灰稳定碎石基层材料疲劳特性研究	113
6.4	水泥石灰粉煤灰稳定碎石基层材料抗冲刷性能研究	118
6.5	本章小结	122
第7章	水泥石灰粉煤灰稳定碎石基层设计参数研究	124
7.1	基层性能要求	124
7.2	半刚性基层现行技术指标	129
7.3	水泥石灰粉煤灰稳定碎石基层设计参数研究	130
7.4	水泥石灰粉煤灰稳定碎石基层设计参数敏感性分析研究	132
7.5	本章小结	140
第8章	试验路铺筑及施工工艺研究	141
8.1	施工前准备	141
8.2	试验路施工工艺研究	143
8.3	现场施工应注意问题及预防措施	151
8.4	实体工程试验路检测	154
8.5	本章小结	155
第9章	水泥石灰粉煤灰稳定碎石基层施工质量控制标准研究	156
9.1	水泥石灰粉煤灰稳定碎石基层平整度控制	156
9.2	水泥石灰粉煤灰稳定碎石混合料离析控制	160
9.3	水泥石灰粉煤灰稳定碎石基层裂缝防治及处理	164
9.4	水泥石灰粉煤灰稳定碎石基层施工质量变异性研究	168
9.5	水泥石灰粉煤灰稳定碎石基层施工质量控制标准	176
9.6	本章小结	181
第10章	主要研究结论	182
	参考文献	185

第 1 章 绪 论

1.1 研究目的和意义

改革开放以来,我国的公路运输事业经历了一次前所未有的发展机遇,取得了举世瞩目的辉煌成就。随着我国经济的迅速发展,高等级公路的里程不断增加。截至 2002 年年底,我国的公路总里程达 176 万 km,位居世界第四位,高速公路通车总里程突破 2.5 万 km,仅次于美国,跃居世界第二位。就我国路面基层结构而言,经历了以下 3 个阶段。

(1) 改革开放初期,为适应中、低交通的泥结碎石及级配砾石路面,其基层主要采用手摆片石、碎石土、碎砖等当地材料。由于交通量小以及是白色透气路面,能承担当时一定的交通量。

(2) 随着公路里程的快速增长,为改善路面行车质量,我国开始采用沥青表面处治路面,而原来的泥结碎石及级配砾石路面改作基层。在推广中发现,含土多、塑性指数大的泥结碎石及级配砾石基层,越来越明显地暴露出它们水稳性不好的弱点。针对这种现象,当时用掺灰的方法对基层进行了处理,取得了一定的效果。

(3) 20 世纪 80 年代,一种以无机结合料稳定粒料(土)类为基层、沥青混凝土为面层的所谓“半刚性路面”被大量应用于高等级公路路面中。由于缺乏高速公路的设计和施工经验,当时高速公路的设计主要参考国外的一些路面结构进行设计。20 世纪 90 年代后,我国新建高等级公路的基层结构形式主要为半刚性基层。基层一般采用无机结合料稳定粒料,厚度为 15~25cm,底基层一般采用无机结合料稳定土,厚度为 15~40cm。

随着国民经济的发展,公路交通量的增长和重载车辆的增加已成必然,为了适应这一发展趋势,以无机结合料稳定粒料类为基层的半刚性基层沥青路面被大量应用于高等级公路。这种半刚性基层材料路面在力学性能上,明显优于我国过去用粒料基层、底基层的沥青路面,具体体现在以下 4 方面。

(1) 具有较高的强度和承载能力。一般来说,半刚性基层材料具有较高的抗压强度和抗压回弹模量(500~3000MPa),并具有一定的抗弯拉强度,且它们都具有强度随龄期而不断增长的特征。目前,国内大多数高速公路在使用期内的代表弯沉值在 20 (0.01mm) 以内。因此半刚性沥青路面通常具有较小的弯沉和较强的荷载扩散能力。

(2) 半刚性基层刚度大,使得其上沥青面层弯拉应力较小(一般小于 0.17MPa),从而提高了沥青面层抵抗行车疲劳破坏的能力,甚至可认为半刚性基层上的沥青面层不会产生行车疲劳破坏,这对于减薄面层,减少工程投资是有利的。鉴于半刚性沥青路面强度、平整度及抗行车疲劳性能较好这一特点,它实际已成为我国高等级公路路面结构的主要

形式。

(3) 半刚性基层材料中二灰碎石基层除了具有以上优点外，还有一项独特的优点即可以变废为宝，有利于环保事业的发展。在这个天天呼吁保护环境的社会里起到了保护环境的作用，无论是从经济角度，还是从社会角度考虑，都是有百利而无一害。

(4) 另外，在半刚性基层结构中，水泥稳定粒料基层除具有一定的强度、刚度和整体性，还具有较好的水稳性和抗冻性，而且可供应的材料种类多，选择面广泛，早期强度高，有利于加快施工进度，在路面的使用过程中弹性变形较小，使用年限长，承载力高。

目前半刚性基层常采用两种类型，一种是水泥稳定类，另一种是石灰粉煤灰稳定类，它们的具体使用方法在《公路路面基层施工技术规范》(JTJ 034—2000)中有较为详细的规定。由于其路用性能经受了较长时期实践的检验，因而在今后其发展前景仍非常广阔。然而，近年来，半刚性基层结构在使用中暴露出某些缺陷，如出现基层反射裂缝，导致路面出现坑槽、下沉等病害；其次在原材料、组成设计、技术指标、施工管理等方面也存在许多问题。水泥稳定粒料由于脆性，尤其对温度、湿度敏感性较强，在施工及使用过程中，在温度或湿度交替变化时容易发生收缩开裂，当沥青面层或水泥混凝土面板较薄时，这些裂缝易反射到面层上来，形成反射裂缝。裂缝不断产生、发展，形成网状裂缝，这不仅降低了道路的服务水平，还破坏了路面结构整体性和连续性，并在一定程度上导致路面结构强度的降低。地表水从裂缝浸入路面结构而得不到及时排出，这会进一步降低已开裂基层的强度。同时，在车辆荷载的反复作用下，基层中的细料和结合料容易被冲刷，从而致使基层料脱落松散，进一步导致整个路面结构的破坏。对于用于高等级公路底基层的二灰稳定类材料，其干缩性能以及水稳性能都较差，如果面基层设计、施工、养护等任一环节处理不好都会引起该层强度降低，形成恶性循环最终导致整个路面结构破坏，影响道路使用性能。

对我国已建成的部分半刚性沥青路面裂缝调查结果见表 1.1，调查表明：半刚性沥青路面裂缝已成为该结构的主要缺陷，不论南方还是北方，通车后第一年最迟第二年均出现大量裂缝。

现场钻芯取样观察表明，裂缝中相当数量为半刚性基层先裂而导致沥青面层开裂的反射裂缝，比例超过 15%，大量反射裂缝在水的浸泡以及行车荷载的冲刷破坏下，由线性破坏迅速发展为网状开裂，直至导致结构性破坏，而传统灌缝处理方法由于施工季节、机械等因素制约，并不能够起到防治作用。此外，尤其是温、湿度变化剧烈地区，反射裂缝的产生及发展削弱了结构强度，加速了面层弯曲破坏。初期产生的裂缝对行车并无明显影响，但随着表面雨水或雪水的侵入，在大量行车荷载反复作用下，会导致路面强度明显下降，产生冲刷和唧泥现象，使裂缝加宽，裂缝两侧的沥青面层碎裂，从而加速了沥青路面的破坏，影响了沥青路面的使用性能。

在设计上，无论是在设计规范中还是在施工技术规范中，集料级配范围的确定上均是根据强度高、干缩性小和抗冲刷能力强提出来的，但是，在混合料组成设计时，无论是石灰粉煤灰比例的确定还是石灰粉煤灰与集料比例的确定均仅是以 7d 强度一个指标为衡量标准，均没有研究过石灰粉煤灰碎石混合料的综合路用性能。在强度形成及使用过程当中，常因温度变化产生温度收缩裂缝和因含水量变化产生干缩裂缝，当沥青面层较薄时这种裂缝

表 1.1

我国部分已建成半刚性沥青路面裂缝调查表

调查路段	竣工时间	裂缝出现时间	开 裂 情 况
沈大高速公路	1986 年	1987 年 3 月	在一段 854m 长的路面上出现裂缝 10 条
沪嘉高速公路	1988 年年底	1990 年 2 月	至 1994 年 16km 道路发现裂缝 1267 条
广佛高速公路	1989 年 7 月	1999 年 1 月	发现横向裂缝 86 条, 纵向裂缝 2 条, 2001 年 3 月, 发现横向裂缝 2188 条, 纵向裂缝 49 条, 至 2002 年 8 月, 裂缝已发展为全线 7400m
保津高速公路	1999 年年底	2000 年 4 月	到 2000 年 9 月, 裂缝长度已达 7520m, 纵缝宽度达 9mm, 2001 年 11 月, 裂缝总长度达 22500m, 最大裂缝宽度为 17mm, 至 2002 年 10 月, 裂缝已发展到 71500m, 在较为严重的路段, 已出现错台
宣大高速河北段	2000 年 12 月	2002 年年底	到 2003 年 4 月, 横向裂缝共计 8876 条, 纵向裂缝共计 20 条, 其中绝大多数横向裂缝为贯通裂缝, 轻微横向裂缝宽度为 1~5mm, 重度横向裂缝宽度为 6~15mm, 个别严重的横向裂缝达到 20~24mm
广花高速公路	1992 年	—	最大车辙深度为 14mm, 平均车辙深为 7.3mm, 裂缝长度为 83.3m/km ² , 裂缝率为 29.2m ² /km ²
深南高速	1990 年	1993 年	使用前 3 年没有裂缝和车辙, 3 年后出现裂缝, 目前裂缝较多, 已成为主要病害, 原因是没有重车通过

往往扩展到面层形成反射裂缝, 最后, 原石灰粉煤灰碎石混合料的设计采用《公路路面基层施工技术规范》(JTJ 034—2000) 中的设计方法, 但稳定类材料的集料级配未作具体系统研究, 不同级配类型混合料和路用性能之间的关系未加以研究。现行规范中虽然粒料占 80%, 但粒料大部分由 4.75mm 以下石屑组成, 而 31.5mm 以上粒料很少, 这样必然造成粒料形不成骨架, 石灰粉煤灰及石屑在起胶凝而不是填隙作用, 只能是悬浮式二灰粒料。

可见, 目前常采用的两类半刚性基层材料存在不足和缺陷, 其诱因源于材料、级配、设计、施工工艺、施工质量控制、养护、保养等多方面。从经济的角度讲, 过去的大量工程实践表明价格相对便宜的石灰、粉煤灰只适合用于铺筑道路结构的底基层。同时, 由于石灰粉煤灰混合料基层早期强度低, 影响施工进度, 这也在一定程度上影响了石灰粉煤灰混合料基层的推广应用。

鉴于以上问题, 本书保留石灰粉煤灰稳定碎石在路面基层中表现出的优良路用性能, 通过掺加一定量水泥, 即对水泥石灰粉煤灰稳定碎石 (水泥石灰粉煤灰稳定碎石) 进行研究, 充分挖掘水泥石灰粉煤灰稳定碎石在道路基层应用中表现出污染小、造价低、强度高的潜力, 根据西安地区自然环境、材料供应情况、施工水平及道路交通状况, 以西安绕城高速公路相关试验路段为实体依托工程, 通过对水泥石灰粉煤灰稳定碎石基层的材料性能、强度形成机理以及路用性能进行系统深入的理论研究, 按照规范要求进行相关室内试验和路段现场试验, 提出西安绕城高速公路水泥石灰粉煤灰稳定碎石基层材料配合比设计、基层设计参数、基层施工工艺、基层施工质量控制标准等一整套经济合理的方案, 并对其进行相关技术经济分析, 最终得出本书研究结论和相关改进性建议。

本书对水泥石灰粉煤灰稳定碎石基层材料的性能、强度、形成机理、配比设计、施工

工艺、施工质量控制以及路用性能进行深入的理论研究，并通过西安绕城高速公路相关实验路段实体依托工程进行实际验证，得出相关的研究结论和改进性建议，对我国的公路建设事业具有重要意义，为交通部路面基层的设计和施工规范的修订提供一定的理论和实践依据，尤其对我国西部各省后续道路建设中采用水泥石灰粉煤灰稳定碎石基层具有重要的指导意义。

1.2 国内外研究概况

1.2.1 国外研究概况

二灰碎石作为替代传统筑路材料的新材料，早在 20 世纪 50 年代中期，已在欧美国家呈稳定增长的趋势。20 世纪 70 年代前半期，它的使用已非常普遍。经历了 20 世纪 70 年代能源危机以后，西欧各国加快了对粉煤灰利用的研究步伐，并对石灰粉煤灰稳定碎石（以干石灰粉煤灰，简称二灰）材料作过大量的研究，在工作道路修筑中的应用，设计与施工工艺等方面，制定了相应的使用规范，并将研究成果应用于道路、机场跑道、停车场等工程的半刚性基层的修筑，总结出了成熟的施工经验。国外对二灰稳定碎石的研究有：

（1）在第十八届世界道路会议上，马格斯（M. F. Maggs，英国）对半刚性基层做了专题报告，认为对于水硬性结合料处置的道路基层不可避免产生裂缝，裂缝的出现更多取决于基层材料的性质、排水有效性以及底基层材料的水稳性。

（2）美国早在 20 世纪上半叶就采用水泥稳定类材料铺筑道路，因此其研究较多。卡兰卡马、胶尔及在《水泥稳定土的收缩特征》一文中，有以下的一些结论：收缩是由于内部水分的损失引起的，水泥稳定材料的收缩率和水泥剂量之间存在很大关系。

（3）美国人诺林（L. T. Noring）在总结了水泥稳定土基层上的沥青面层使用性能和裂缝的基础上得出水泥稳定土的收缩主要是干缩的结论。

（4）赫尔佐克（Aherzog R. Rock）研究了影响二灰稳定土强度的因素。

（5）安德烈（Andrer. J）研究了影响二灰碎石混合料耐久性的因素。

（6）美国交通运输研究所提出了基层材料的级配要求，要求从胶体至粗颗粒均应级配良好。

（7）巴伊卡尔（Baykal）和格克汗（Gokhan）总结出了短高温养护和低温养护之间的关系。

（8）米尼克（Minick）得出了二灰碎石各组成部分对其力学性能有较大影响的结论。

1.2.2 国内研究概况

我国自 20 世纪 50 年代即新中国成立初期便开始在道路建设中应用石灰土作为路面基层，当时结合料不是水泥、石灰粉煤灰之类的材料，而是以石灰岩粉充当结合料。到 20 世纪 60 年代末 70 年代初，出现了油渣路面，这也是路面发展的一个标志阶段，但当时出现了翻浆现象，此时就引起了人们的反思，同时也出现了半刚性路面的雏形。20 世纪 70 年代以来，二灰碎石成为了目前路面工程中使用最广泛的两种半刚性基层材料之一。二灰

碎石基层的使用过程，也是人们对其组成及结构认识的深入过程，有关二灰碎石基层材料的配合比设计及路用性能指标，随着施工机械的改进及施工方法的提高，也在不断改变，日趋完善。

20 世纪 60 年代末的三渣和 70 年代初的二灰掺石用于路面基层，虽然都具有良好的力学性能，但由于三渣和二灰掺石基层结构的集料含量仅为 50%~60%，必然悬浮于二灰胶结料之中，由于在使用期内三渣基层和二灰掺石产生的收缩裂缝，反映到沥青面层表面，严重影响到路面的使用品质。研究认为，二灰碎石材料中石灰粉煤灰自身的收缩量较大是主要原因。在悬浮式结构的二灰碎石中，集料颗粒完全被石灰粉煤灰隔开，不能起到骨架作用，所以不能有效抑制石灰粉煤灰的收缩。

20 世纪 70 年代末混合料中集料的含量由 60% 提高到 75%~80%，即改二灰掺石为二灰结石结构，并控制集料的最大颗粒尺寸为 40mm（圆孔筛）。这一基层结构不仅有着较高的力学强度，而且能够基本避免收缩裂缝的产生两大优点。正因如此，二灰结石基层结构得以在全国推广应用。

进入 20 世纪 80 年代后随着交通量的增加，为了推广具有较高强度的石灰粉煤灰稳定粒料基层结构，国家和交通部分别于“七五”和“八五”期间列项重点研究，并取得了很多成果。但在此期间的石灰粉煤灰碎石基层结构也有着明显的缺陷：集料的大粒径、无级配以及混合料拌和摊铺工艺水平低下，从而构成了路面基层结构的平整度、均匀性、强度和耐久性欠佳。以大粒径集料为骨架的二灰结石混合料，难以采用机械拌合、摊铺的施工工艺，也就无法适应高等级公路路面基层的需求。人们开始采用具有一定级配的集料颗粒，且集料在混合料中所占的比例也有所增加，并采用强制式拌合机加强混合料的拌合，采用重型压路机加大成型压力，以形成性能良好的嵌挤式二灰碎石，希望能够达到显著降低二灰碎石基层收缩量的目的。

1993 年，交通部发布的《公路路面基层施工技术规范》（JTJ 034—2000）对石灰粉煤灰碎石的原材料性能、配比要求都作了比较详细的规定。将用作高等级道路基层集料颗粒最大粒径缩小到 31.5mm，并认为当石灰粉煤灰与集料的质量比在（15：85）~（20：80）之间时，集料在混合料中起到骨架作用，石灰粉煤灰起填充作用，从而使混合料具有较高的密实度，形成密实骨架结构，以期提高其强度，减小其收缩，提高其抗冲刷能力。然而，《公路路面基层施工技术规范》（JTJ 034—2000）中所规定的二灰碎石混合料粗集料含量偏少且 4.75mm 以下集料含量过大，造成了不可避免的基层温缩裂缝、抗冲刷能力差，极易造成沥青路面的唧浆损坏。2000 年发布的《公路路面基层施工技术规范》（JTJ 034—2000）中二灰碎石的集料级配对 1993 年级配各筛孔的集料通过量进行了调整，但相对 1993 年规范的二灰碎石结构特性并未产生质的变化。基层温缩裂缝抗冲刷能力差，极易造成沥青路面的唧浆损坏等，仍是不可避免的。

苏州市交通工程质量监督站认为，在确保混合料强度和均匀性的前提下，适当增加 4.75mm 以上粗集料的含量，力求粗集料在混合料中形成骨架；减少 4.75mm 以下尤其是 2.36mm 以下细集料的含量，同时控制细集料与石灰粉煤灰之间的合理配比，以尽可能地在总量上降低二灰碎石基层的收缩系数，提高其抗裂性能，同时增加其抗冲刷性能。在确定集料级配时，采用 k 法计算集料的各级筛孔通过率。

上海市政工程研究院的研究认为,为了改善二灰碎石的力学性能和便于机械化施工,以增加混合料的密实效果,采用颗粒粒径为 50~40mm 的集料替代 50~80mm 的粗集料,对集料级配不作严格要求,只要有一定级配即可,并且认为 0~5mm 粒径的集料在碎石中含量不稳定,如果太多,将会起不到石料的骨架作用,还会增加裂缝出现的机会,对石灰粉煤灰的胶结作用带来不良的影响。

原西安公路学院的研究认为,半刚性基层的开裂是由于行车荷载与半刚性基层材料的收缩双重作用引起,所以抗裂设计也应包括力学强度和抗收缩开裂两个方面的指标要求,最佳配合比设计无疑是提高半刚性基层抗裂能力的主要措施之一。最佳配比选择的基本原则是根据环境条件、调查资料,确定该地区的基层材料以何种收缩为主,作为确定配合比设计的依据。通常情况下,集料含量在 75%左右时,具有最佳的抗温度收缩开裂的能力。

同济大学认为,针对石灰粉煤灰或水泥石灰粉煤灰稳定碎石类,其材料组成可采用填充理论,同时还需解决石灰粉煤灰的合理比例。骨料的合理含量要根据实际材料计算,骨料空隙部分即为密实的结合料含量,关于石灰与粉煤灰比例,以 (1:3)~(1:4) 为最好,但石灰在混合料中含量也不得低于 5%。

吉林省高速公路管理局提出了二灰碎石混合料的嵌挤式骨架模型。认为在材料组成方面,由石灰和粉煤灰组成的结合料的质量应占混合料总质量的 20%~25%,集料的质量应占 75%~80%。与以往室内试验不同的是,他们采用上置平面式的振动压实制件装置,能够较好地再现现场振碾工况。

哈尔滨建筑工业大学认为,以前的石灰粉煤灰或水泥石灰粉煤灰稳定碎石类,结构模型概括为“松排骨架,紧密填充”,而当时基层施工都是采用静态碾压,在室内一律采用击实或加压成型。因而在水泥石灰粉煤灰稳定碎石中集料的用量,在一实方混合料中最多为一松方,压实后的混合料,集料刚刚靠拢而不密实,剩余空隙才有可能全为结合料所填充,使结合料的胶结和骨架共同发挥作用。然而这种二灰碎石在实践中的使用并未取得令人满意的效果,它虽然解决了半刚性基层稳定性的问题,但其往往伴随着压密性差、早期强度低和耐疲劳性能差的问题。实际使用中,尤其在北方,容易造成路面基层低温缩裂、路面面层反射裂缝,进而使路面破坏。由于目前在基层施工过程中普遍采用重型振动压路机,因而二灰碎石的组成符合紧密嵌挤骨架密实结构,突破松排骨架中集料的用量极限,减少收缩系数以提高混合料的抗裂性,再以具有振动状态下最大干密度的结合料来填充集料间的空隙,以最少量的填隙获得最大的填隙率,得到混合料的最大密实度,从而达到混合料最好的力学性能,提高半刚性基层各方面的性能指标。

以上各种组成结构观点代表了二灰碎石从出现到逐渐走向成熟生产工艺的发展过程,也说明了在使用过程中,人们对二灰碎石的组成结构和性能的认识在不断地深入。随着路面结构要求的提高和生产工艺的改进,二灰碎石的路面结构使用性能也得到了改善。最初只是用于轻交通量的石灰粉煤灰混合料,接着是在二灰中加入一些粗颗粒的集料形成悬浮的二灰碎石,然后随着使用要求的提高,对集料进一步提出要求,有一定级配、颗粒粒径较小的集料取代了原先单粒径粗颗粒集料,形成骨架型的二灰碎石。目前由于大吨位振动压路机的使用,使得集料颗粒在二灰碎石混合料中从以前的松散排列向紧密骨架结构过渡。

综上所述,国内外对半刚性基层的研究主要集中在二灰稳定类 and 水泥稳定类两种,在

研究温度收缩和干燥收缩方面,主要通过调整集料级配、胶结料用量等方法,而水泥石灰粉煤灰稳定类的系统研究却较少。

1.3 主要研究内容及技术路线

本书保留石灰粉煤灰稳定碎石在路面基层中表现出的优良路用性能,通过在石灰粉煤灰稳定碎石中掺加一定量的水泥,即对水泥石灰粉煤灰稳定碎石(水泥石灰粉煤灰稳定碎石)进行研究,充分挖掘水泥石灰粉煤灰稳定碎石在道路基层应用中表现出污染小、造价低、早强度高、路用性能好的潜力,制定出如下主要研究内容及技术路线。

1.3.1 主要研究内容

当前,国内外对石灰粉煤灰稳定碎石的研究较为深入,研究成果丰富,且工程实例较多,对此,课题组拟定主要研究内容如下。

(1) 沿线路用材料性能调查。调查分析自然环境、交通量、交通分级及未来交通量预测等,调研沿线水泥、石灰、粉煤灰、集料的技术指标、规格、供应量等。

(2) 水泥石灰粉煤灰化学反应机理研究。从化学反应机理的角度研究在二灰碎石中用外掺法加入适当比例的水泥后,水泥、石灰、粉煤灰间化学反应的方向、限度以及速率。主要研究了粉煤灰对水泥水化的影响、水泥对火山灰反应的影响、石灰对水泥水化、火山灰反应的影响以及水泥—石灰—粉煤灰系统的水化。

(3) 水泥石灰粉煤灰稳定碎石基层材料配合比研究。在交通状况及路用材料的调查、筛选的基础上,结合水泥石灰粉煤灰稳定碎石化学反应机理的特点,进行相关室内试验、数据分析,从材料配合比设计及力学性能出发,确定半刚性基层材料集料的最佳级配、结合料的最佳配合比及性价比合理的水泥石灰粉煤灰稳定碎石基层材料。

(4) 水泥石灰粉煤灰稳定碎石基层材料收缩性能研究。从微观机理出发,分析水泥石灰粉煤灰稳定碎石基层材料温度收缩机理、干燥收缩机理及其基本特点,进行相关收缩性能评价试验,验证所选定水泥石灰粉煤灰稳定碎石基层材料配比是否满足各项技术要求,是否有利于提高半刚性基层抗裂性能,提出基于抗裂性能的半刚性基层材料配合比设计方法和相应的抗裂评价指标。并对试验路面使用以来的开裂情况进行调查,提出科学有效的开裂防治措施。

(5) 水泥石灰粉煤灰稳定碎石材料路用性能研究。分析水泥石灰粉煤灰稳定碎石材料疲劳特性、抗冲刷性能。

(6) 水泥石灰粉煤灰稳定碎石基层设计参数研究。根据现行技术规范对基层材料的性能要求,综合考虑西安绕城高速公路路面结构的特点,提出水泥石灰粉煤灰稳定碎石基层设计参数、基层力学设计参数,并对其进行温度敏感性分析。

(7) 水泥石灰粉煤灰稳定碎石基层施工工艺技术研究。从拌和、运输、摊铺、碾压、接缝处理、养生等方面对水泥石灰粉煤灰稳定碎石的施工工艺进行研究,对现场施工应注意的问题进行分析,提出相应的处理措施。

(8) 水泥石灰粉煤灰稳定碎石基层施工质量控制技术研究。分析水泥石灰粉煤灰稳定

碎石基层平整度的影响因素，提出相应控制平整度的对策；结合水泥石灰粉煤灰稳定碎石施工工艺，制定出原材料检测方法与标准和施工质量控制技术与标准。

(9) 水泥石灰粉煤灰稳定碎石基层实体工程铺筑与技术经济分析。根据本书实体工程，实验路段铺筑的具体情况，以及后期检测资料的分析，对水泥石灰粉煤灰稳定碎石基层的技术经济可行性进行分析论证。

1.3.2 技术路线

编者根据以上研究的主要内容制定了本书的技术总路线图见图 1.1，其中水泥石灰粉煤灰稳定碎石最佳配合比研究方案见图 1.2。

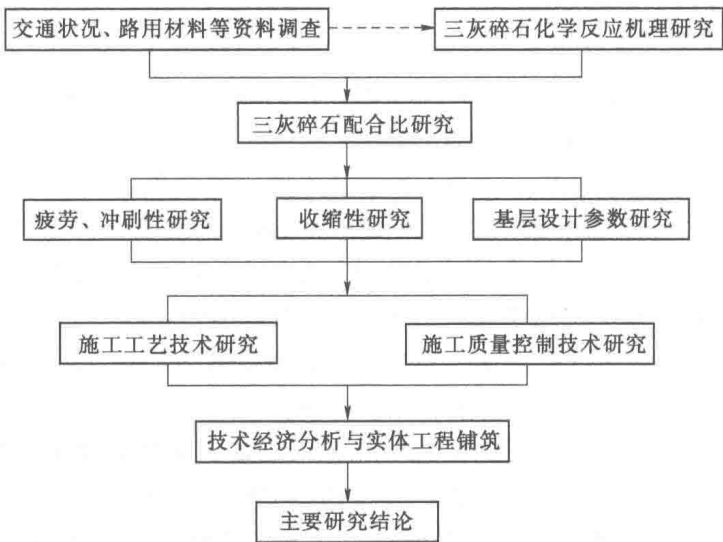


图 1.1 技术总路线图

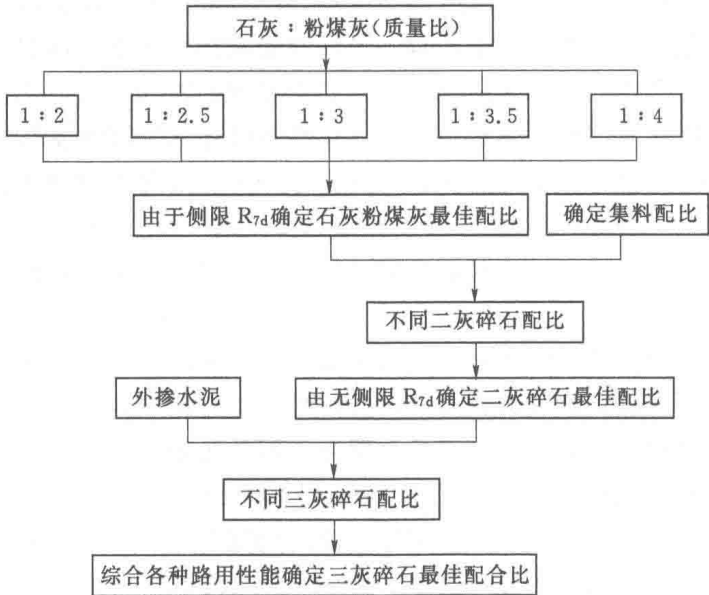


图 1.2 水泥石灰粉煤灰稳定碎石最佳配合比研究方案

第 2 章 沿线路用材料性能及交通状况调查

2.1 工程简介

2.1.1 依托工程简介

西安绕城高速公路是陕西省实施西部大开发的标志性基础设施建设项目之一，是陕西省公路主骨架的枢纽。路线全长 80km，设计行车速度 120km/h，桥梁设计荷载：汽车-超 20、挂车-120 级，路基宽度 35m，全封闭、全立交、双向六车道，是陕西省乃至西部地区目前设计标准最高、设施最完善、通行能力最大的高速公路。

全线设互通式立交 12 处、分离式立交 56 处、跨线桥 43 座、特大桥 7 座、大桥 3 座、中小桥 21 座、通道 115 道。绕城公路项目分南北两段建设。绕城北段于 1998 年 10 月开工建设，2000 年 10 月 28 日建成通车。概算总投资 18.3 亿元。绕城南段于 2000 年 10 月开工建设，2003 年建成通车。具体地理位置见图 2.1。

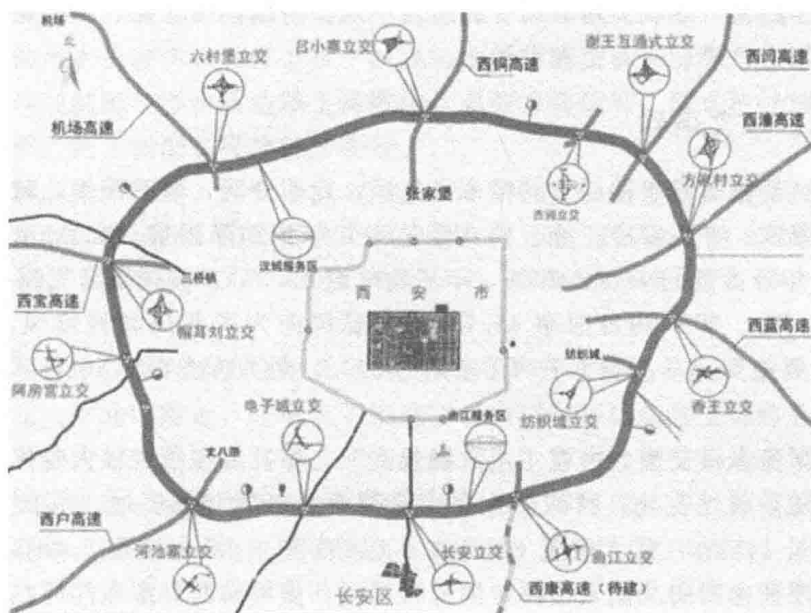


图 2.1 绕城高速地理位置图

西安绕城高速公路南段路面第 20 合同段是国家重点项目两纵两横的一部分，又是西安绕城高速公路南段，是国道主干线 GZ40（二连浩特—河口）的一部分，也是西安

绕城高速公路北段的延伸，起于西安绕城北段帽耳刘立交，沿秦阿房宫遗址西侧纪阳组团，经大苏村、泮镐村、田家寨、河池寨、里花村、沈家村、三爻村、曲江水厂、春临村、马腾空粮库，止于西安绕城高速公路北段方家村立交。全线长 44.905km，其路面结构为：4cm 沥青混凝土（AC-16）、5cm 中粒式沥青混凝土（AC-20 I）、6cm 粗粒式沥青混凝土（AC-25 I）、（18+15）cm 水泥石灰粉煤灰稳定土碎石基层（水泥外掺量为 2%）。

2.1.2 地理位置和地形地貌

西安市位于关中盆地中部，地理位置在东经 $107^{\circ}40' \sim 109^{\circ}49'$ 、北纬 $33^{\circ}39' \sim 34^{\circ}45'$ ，四周与渭南、咸阳、宝鸡、安康、商洛、铜川等地相邻。是我国内地中心地区，处于南北、东西经济带的结合部，也正处于东起连云港、西至鹿特丹的欧亚联系区位轴线上，成为我国东部广大地区通往西部的交通枢纽。

西安市所处的关中平原，号称“八百里秦川”，为渭河、泾河、洛河等河流的冲积平原。土层深厚，土地肥沃，物产丰富。在平原南北两侧的秦岭山脉和渭北塬区，蕴藏有丰富的煤炭等非金属和多种金属矿产资源，动植物资源种类繁多。

西安市南倚秦岭，北临渭河，处于渭河断陷盆地中部南缘地带，该地带堆积了巨厚的第三纪、第四纪松散地层，地势东南高、西北低，由东南向西北呈阶梯式下降，南部为雄伟高大的秦岭山脉，向北极大高差突降至关中平原，两者分界明显地貌特征殊异。秦岭为褶皱断块山脉，东西延绵，横亘于西安市南部，区内长约 200km，一般海拔 1500～2000m，西安市区地势平坦，海拔为 400m 左右。

本工程位于西安，地貌上属泾河一级阶地，地势平坦，西北低、东南高，地层岩性主要为第四纪全新世冲洪积碎石土和黏性土。

2.1.3 气候、水文条件

项目所在区属暖温带半湿润大陆性季风气候，四季分明，冬季干旱，秋季阴雨，夏季炎热。夏季多暴雨、冬季寒冷干燥。降雨量适中，年平均降雨量 580.2mm，主要集中在 7—9 月，占全年降雨量的 45%～60%，年平均气温 13.3°C ，极端最高气温 41.7°C ，极端最低气温 -20.6°C 。年平均日照率 45.7%，主要风向为东北风和西南风，年平均风速 1.7m/s ，最大风速 25m/s ，多年平均无霜期为 210d，最大冻土深度 15cm。区域气候条件良好。

西安四周河流纵横交错，古有“八水绕长安”之称，现在虽有很大变化，但仍有许多河流，其水量随季节性变化，黄河的主要支流渭河从市区北部流过，全长 818km，自西向东，境内流长 141km，最大流量 $6210\text{m}^3/\text{s}$ （1981 年），最小流量 $3.4\text{m}^3/\text{s}$ （1973 年）。东面有泾河、灞河由南向北汇入渭河，西南有泾河、泾河向西北汇入泾河，泾河与泾河由南向北汇入渭河。灞河属渭河一级支流，发源于蓝田、渭南、华县交界的箭峪岭，于西安市灞桥区三郎村汇入渭河，全长 104km。

项目区内有泾河流过，地下水主要为潜水和承压水两类，分布于河漫滩。潜水埋深 5～10m，其余地区 5～20m，主要赋存于圆砾中，一般潜水水质对混凝土不具腐蚀性。