

C106



分类号 U416

单位代码 10618

密 级 _____

学 号 106250554

重慶交通大學

硕士学位论文

论文题目: 黔北电厂粉煤灰半刚性路面基层性能研究

Research on the Performance of Semi-rigid
Roadbase with Fly-ash from Qianbei Power Plant

研究生姓名: 涂 帅

导师姓名、职称: 杨锡武 教授

申请学位门类: 工 学

专 业 名 称: 道路与铁道工程

论文答辩日期: 2009 年 5 月 23 日

学位授予单位: 重 庆 交 通 大 学

答辩委员会主席: 周进川 研究员

评阅人: 周进川 研究员

吴国雄 教授

2009 年 5 月

摘 要

半刚性基层以其强度高、造价低廉、原材料来源广等优点，在我国的高等级公路建设中被广泛用作路面基层。

位于贵州毕节地区的黔北电厂，对振兴和拉动贵州地方经济的发展做出了重要贡献。但其长期运行产生了大量的固体废物——粉煤灰，对其处理一般采用填埋。由于粉煤灰是极细颗粒状的，在风力作用下易造成扬沙或沙尘暴而造成大气污染；在雨水冲刷作用下易造成水域污染；同时由于粉煤灰呈碱性，用它作肥料的添加剂会造成土地的碱化、板结而降低土壤的肥力。为对黔北电厂粉煤灰进行妥善处理，本课题将对黔北电厂的粉煤灰在筑路材料应用方向进行研究，考察黔北电厂粉煤灰的半刚性基层路用性能。

石灰粉煤灰稳定碎石基层是一种典型的半刚性基层类型，在我国已有较长的应用历史，积累了丰富的设计、施工经验并建立了完善的评价体系，在过去的几十年里为我国公路建设作出了巨大的贡献。但其固有的早期强度较低，收缩严重等问题一直存在。与石灰粉煤灰稳定碎石相比，水泥粉煤灰稳定碎石作为一种新型的半刚性基层类型，具有早强、高强、裂缝少、可提前开放交通、后期强度仍有较大增长的特点，有利于承受日益增长的交通特别是重载交通的需要。

本文通过室内试验和理论研究，对黔北电厂粉煤灰的物理力学性能和化学指标等进行了详细分析；系统开展了黔北电厂粉煤灰的石灰粉煤灰稳定碎石和水泥粉煤灰稳定碎石的力学性能、稳定性能、收缩性能等半刚性基层路用性能研究，结合这些性能提出了最佳配合比范围，并对这两种不同类型混合料的各项路用性能进行了详细对比；通过分析骨架密实型水泥（石灰）粉煤灰稳定碎石半刚性基层的强度形成过程和收缩机理，提出了强度形成和收缩的影响因素。为黔北电厂粉煤灰的半刚性基层的应用提供指导。

关键词：半刚性基层；粉煤灰；路用性能；收缩；应用

ABSTRACT

In the highway construction of our country at present, the semi-rigid material is widely used for its high intensity, low cost, and being wide of the raw material source.

The Qianbei power plant is located in Bijie of Guizhou province, and it has made important contributions to the local economy development. But its long-term running have brought a lot of solid waste-fly ash, usually it is dealt with landfill. As the fly ash is very fine granular, under the wind blowing it usually cause air pollution or dust blowing; Under the erosion of rainwater it will cause water pollution; And as the fly-ash is alkaline, when it is used as fertilizer additives, will cause the alkalization and compaction of land, reduce the fertility. In order to properly dispose the fly-ash of Qianbei power plant, in this subject we will study on the fly-ash as road construction materials, inspect the pavement performance of semi-rigid base which is mixed into the fly-ash from Qianbei power plant.

Lime and fly-ash stabilized crushed-stones base is one typical semi-rigid base, has a long history of application. We have accumulated a wealth of design and construction experience, and have established a sound evaluation system.

Lime and fly-ash stabilized crushed-stones base has made great contributions to the highway construction in the past few decades in China. However, its inherent problems such as lower early strength, serious shrinkage are always existent. Compare with lime and fly-ash stabilized crushed-stones, as a new type of semi-rigid base, the cement and fly-ash stabilized crushed-stones has many characteristics, such as early-strengthening, high strength, less cracks and early-opening to traffic. Besides, it also has drastic growth in post-strength and benefits in supporting the increasing transportation, especially to the heavy loading transportation.

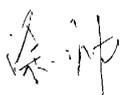
According to laboratory tests and theoretical research, the physical and mechanical properties, chemical indicators of the fly ash are detailedly analysed; Systematically study the pavement performance of lime and fly-ash stabilized crushed-stones and cement and fly-ash stabilized crushed-stones which are mixed fly-ash from Qianbei power plant, include mechanical performance, stability performance and shrinkage performance. Combined with these performances bring out the best mix scope, and make detailed comparison of pavement performance between the two types. Throught analyse the formation process of Strength and

shrinkage principium of the semi-rigid roadbase-skeleton dense type cement(lime) and fly-ash stabilized crushed-stones, bring out the influencing factors of Strength formation and shrinkage; Provide guidance for the application of fly-ash from Qianbei power plant in semi-rigid roadbase.

KEY WORDS: semi-rigid roadbase; fly-ash; pavement performance; shrinkage; application

重庆交通大学学位论文原创性声明

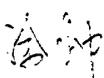
本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：

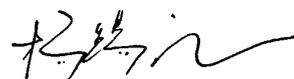
日期：09年5月23日

重庆交通大学学位论文授权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权重庆交通大学可以将本学位论文的全部内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。同时授权中国科学技术信息研究所将本人学位论文收录到《中国学位论文全文数据库》，并进行信息服务（包括但不限于汇编、复制、发行、信息网络传播等），同时本人保留在其他媒体发表论文的权利。

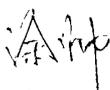
学位论文作者签名：

日期：09年5月23日

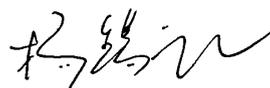
指导教师签名：

日期：09年5月23日

本人同意将本学位论文提交至中国学术期刊（光盘版）电子杂志社 CNKI 系列数据库中全文发布，并按《中国优秀博硕士学位论文全文数据库出版章程》规定享受相关权益。

学位论文作者签名：

日期：09年5月23日

指导教师签名：

日期：09年5月23日

第一章 绪 论

1.1 引言

粉煤灰是煤粉经过燃烧后形成的一中粘土类的火山灰质细粒分散装残余物,主要来源于以煤为燃料的火力发电厂和燃煤企业大户。国外称为飘灰或飞灰(Fly-Ash),我国称为粉煤灰。^{[1][2]}

我国是世界燃煤发电大国之一,粉煤灰排放量居世界首位。随着我国经济的发展,能耗量的增长速度会越来越快,排放粉煤灰的量还会更大:1995年累计排放量达1.25亿吨,2000年达到1.53亿吨,2005年,全国燃煤电厂和低热值电厂排放的粉煤灰高达3.3亿吨以上,占全国固体废弃物的40%。煤炭、电力行业利用粉煤灰2.1亿吨左右,利用率为66%,创造了较好的综合效益,但利用水平还是较低。^[3]

作为固体废物,粉煤灰具有多方面的危害,可以大致分为水域危害、大气危害以及土壤危害。粉煤灰目前的处理方法为填埋,由于粉煤灰是极细颗粒状的,在风的作用下极易造成填埋地附近扬沙甚至沙尘暴而造成大气污染,特别是我们国家是一个多风的地区,粉煤灰对大气的危害更为严重。填埋地一般悬在山间等低洼的地方,经过雨淋冲刷极易造成水域的污染,污染水通过径流或者地下渗透而造成更大的危害。由于粉煤灰呈碱性,用它作肥料的添加剂会造成土地的碱化、板结而降低土壤的肥力。^[4]

位于贵州省毕节地区金沙县的黔北发电总厂装机170万千瓦,连续几年年发电量上百亿千瓦时,对振兴和拉动贵州地方经济的发展做出了重要贡献。近年来,电厂的长期运行产生了大量的固体废物粉煤灰,严重污染环境,危及群众身体健康,为解决这令人头痛的固体废物,火电厂征用大量的土地进行堆放,占用了大量的土地资源,还带来一些社会问题,给企业的生存和持续发展带来了巨大压力。为缓解压力,企业投巨资对发电机组所排粉煤灰进行收集、分选,已建成了年产量达200万吨的专业粉煤灰生产公司,并积极寻找粉煤灰的利用渠道。

粉煤灰是可利用的资源,合理利用粉煤灰是我国重要的技术经济政策之一,国务院、国家计委、国家经贸委曾多次要求“积极开展粉煤灰资源综合利用”。目前粉煤灰已在建工、建材、筑路、回填、造田等方面取得了广泛的应用,取得了较好的环境效益、社会效益和经济效益。随着我国经济的发展,公路通车里程逐年增加,资料表明我国已修筑的高速公路95%以上使用了半刚性材料做基层,而水泥粉煤灰稳定碎石和石灰粉煤灰稳定碎石又是半刚性基层的主要形式,因此,粉煤灰用作路面基层材料具有广阔的应用前景。

本课题将对黔北电厂的粉煤灰在筑路材料应用方向进行研究,用此粉煤灰制成水泥粉煤灰稳定碎石和石灰粉煤灰稳定碎石两种目前常用的半刚性基层混合料,通过大量试验研究和对比,了解该厂所产粉煤灰作为路面半刚性基层材料的各项性能。变废为宝,不仅解决电厂粉煤灰堆放问题,也为道路工程的修建提供一种价廉质优的材料,降低工程造价,减少环境污染,提高工程质量,降低养护成本,实现节约型交通建设。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 国外粉煤灰的研究现状:

粉煤灰是一种人工火山灰,近代火山灰的应用技术是从18世纪初用石灰火山灰砂浆修筑爱迪斯顿灯塔开始的。这个耐海水腐蚀的灯塔的成功修建唤起了后来学者们对水硬性胶凝材料的深入探索,导致了数十年后出现了波特兰水泥。

早在1933年,美国伯克利加州理工学院对粉煤灰在混凝土中的应用进行了系统的研究。

粉煤灰真正引起人们足够重视是在20世纪50年代以后,尤其是70年代中期石油危机以后,世界上许多国家发电厂的燃料结构发生了变化,都加快转向以煤炭为主要燃料的进程。而随之而来的是大量的粉煤灰的排放,这进一步促使更多人重视粉煤灰资源的综合利用。^[5]

在发达国家粉煤灰资源化程度现在已很高,日本、荷兰已达100%,其他有些国家再利用技术及设备的研究等方面也比较领先。

目前在国外,粉煤灰主要应用领域集中在:水泥与混凝土工业,土木工程中结构回填材料,建筑材料,农业,环境保护工程,再生材料工程工业材料等。

在筑路材料方面的应用:由于粉煤灰的颗粒细,密度小,有级配和火山灰活性等特性,粉煤灰已被用作路堤填筑材料^[6],同时用石灰或水泥稳定的粉煤灰已经用于道路路面的基层与底基层。在英国道路研究试验室,索尔福德和格拉斯哥大学,在60年代初期就做了广泛的研究与发展工作,运输部(随后为环境部)提出了粉煤灰—水泥基层和底基层规范。法国自1957年以来,就把粉煤灰用于路面建筑,粉煤灰—水泥拌合物已在一些干线公路用作底基层,并发现它比其他地方筑路材料更优质、更廉价。

在美国不同地区,已经有几个现场试验和验证工程对水泥粉煤灰稳定碎石基层路面的性能作了评价。试验路段包括那些建于密苏里州的堪萨斯城,西弗吉尼亚州的海伍德和查尔斯顿,现场试验的结果至今都还良好。

国外用于水泥稳定粉煤灰混合料基层的厚度设计方法,只要求混合料经久耐用,耐久性评定方法是以无侧限抗压强度为基础的。英国配料设计标准是以抗压

强度为基准，把规定的抗压强度作为混合料抗冻害能力的指标。

1.2.2 国内粉煤灰的研究现状：

我国粉煤灰的研究与利用起始于 20 世纪 50 年代，并于 60 年代设立了专门机构，开展这方面的工作。

70 年代北京修建地铁时开始生产符合日本标准的磨细粉煤灰，推动了我国粉煤灰的技术进步；改革开放后更是把粉煤灰的利用作为经济政策提升到战略高度，“八五”期间累计利用粉煤灰达 1.7 亿吨，到 1998 年利用率上升到 53%。^[7]

左文生等运用运筹学的分析方法对粉煤灰资源化利用的研究表明^[8]：应该优先发展粉煤灰资源化技术，使电厂排放的粉煤灰质量可靠，从而带动粉煤灰在交通筑路、筑坝，建材工业，建筑工程等方面的综合利用。应开发经济、高效的粉煤灰资源化技术，实现粉煤灰的资源化，将作为固体废物的粉煤灰变成不同层次的再生资源；然后针对这些再生资源的特性，寻找相应的利用途径。

目前我国粉煤灰的综合利用技术有近 200 项，其中得到实施应用的近 70 项，主要有以下几类：

- ① 建材制品方面的应用；
- ② 建设工程方面，用于道路工程；
- ③ 农业应用，作为填筑材料；
- ④ 从粉煤灰中提取矿物和高值利用。

其中用于道路工程的粉煤灰约占粉煤灰利用总量的 20%。主要技术有：粉煤灰、石灰石砂稳定路面基层；粉煤灰沥青混凝土；粉煤灰用于护坡、护堤工程和修筑水库大坝等。

1) 粉煤灰用于路面基层工程

粉煤灰是一种很好的基层修筑材料，用粉煤灰、石灰和碎石等按一定的比例混合搅拌制作的路面基层材料，具有均匀性好、自重轻、强度高有点。同时，施工简便，道路使用寿命延长 4 倍以上，特别适用于修筑城市快速路或主干路的上基层，采用粉煤灰石灰砂砾混合料基层的沥青路面与原砂砾基层路面相比，在 15 年使用期间内每平方米可节约工程费用 8.91 元。现在我国常用的路面基层材料是粉煤灰二灰土和粉煤灰三渣混合料^[9]。

2) 粉煤灰沥青混合料

粉煤灰沥青混合料是以沥青为胶结料，按比例加入一定级配的集料和粉煤灰填充料，加热拌制而成。以粉煤灰作填充料的路面用沥青混合料，不仅具有优越的技术性能，还可以降低路面成本。

3) 粉煤灰路堤工程

粉煤灰代粘土做路堤也是一种良好的工程材料。粉煤灰自重轻于粘土，其碾

压最佳含水量范围大,又有较好的活性,或全灰或一灰一土用于构筑路堤,既可减轻自重,又可减少路面沉降量,还能缩短施工周期。

其中粉煤灰用于路面基层的发展:

我国自 50 年代便开始在道路建设中应用石灰稳定土作为路面基层,而且在其后的几十年中石灰稳定类半刚性材料一直是我国等级公路的主要基层类型。从 70 年代中期,我国开始使用水泥稳定材料作基层。80 年代随着国家经济的持续发展,由于意识到了公路交通对国民经济发展的的重要促进作用,我国开始大规模地发展公路交通。90 年代至今,公路的建设仍然处在高峰阶段,每年相继有上万公里的公路建成通车,其中包括上千公里的高等级公路。在这期间以水泥稳定材料和石灰、粉煤灰稳定材料为代表的半刚性材料占到各等级公路路面基层材料用量的 95% 以上。

近年来,水泥粉煤灰稳定碎石基层在我国的一些省份获得了应用,实践表明它具有优良的路用性能和很好的应用前景。然而,目前《公路路面基层施工技术规范 JTJ034-2000》等标准和规范中没有响应的技术规定,且已有的研究结论又缺乏系统性,因此设计和施工单位在具体应用时随意性很大。

从原理上来看,水泥与粉煤灰和石灰与粉煤灰的反应机理很相似,实际上都是氢氧化钙与粉煤灰玻璃体的反应,只不过水泥能形成较高的早期强度。水泥稳定粉煤灰基层和底基层代表粉煤灰的一种独特应用,在这里粉煤灰既作火山灰材料又作骨料。除粉煤灰和水泥的天然火山灰反应继续产生后期强度外,粉煤灰和水泥之间的力学作用很像水泥细粒土,水泥粉煤灰混合料强度随时间增长的特性,硬化的混合料比很多水泥土混合料有较高的疲劳性能。

实际上我国在 80 年代,就有尝试用水泥代替石灰作二灰碎石层,四浑线平岗至三合线是吉林省公路勘测设计院 1986 年设计的二级公路。原设计二灰碎石上基层配合比为 8: 18: 74,铁路规定生石灰雨季不能运输,只能运消解的石灰,所以亏方量较大,检验钙镁含量有的达不到 50%,部分因遇雨成膏状不能使用,经测算有效可用的石灰每吨造价 120 元之多,质次价高。为保质量,保工期,降低成本,提出用水泥代替石灰作二灰碎石层。在 43K—46K+760 段计 3760m 用水泥粉煤灰稳定碎石作上基层,其施工配合比为水泥:粉煤灰:碎石=4: 20: 76,效果很好。

山东枣庄世纪大道工程路面总厚 55cm,基层采用 16cm 厚水泥粉煤灰稳定碎石。江西梨园至温家圳高速公路全场 244.749km。该段路面基层采用水泥粉煤灰稳定碎石,这是在国内第一次使用水泥粉煤灰稳定碎石作为高速公路路面的基层。根据二灰稳定碎石的施工经验和相关规范,水泥粉煤灰与集料的比初步采用 20: 80~15: 85。集料级配采用规范级配的中值,水泥采用水泥稳定土基层技术规范中关于水泥的质量要求,粉煤灰采用石灰粉煤灰稳定土基层技术规范中关于粉煤灰的

质量要求,碎石采用石灰粉煤灰稳定土基层技术规范中关于碎石的质量要求。^{[10][11]}

随着水泥粉煤灰稳定碎石更多的应用,一些研究单位也相应开展了关于它的强度和路用性能的研究。

在水泥粉煤灰稳定类混合料微观机理研究方面,交通部科学研究院的萧赓等通过 X 射线和扫描电子显微镜,分析了水泥粉煤灰级配碎石基层混合料微观结构形成过程,揭示了其强度形成机理。在水泥粉煤灰稳定类混合料路用性能研究方面,萧赓等未来能够对水泥粉煤灰混合料的力学特性有一个全面的定性认识,进行了 12 组配合比的水泥粉煤灰混合料 7d 强度及模量实验。得到的结论是水泥粉煤灰级配碎石基层混合料早期性能随粉煤灰掺量的提高有所下降,但其后期性能明显优于普通水泥稳定级配碎石混合料。在保证初期养护的条件下,其后期强度高、模量低、收缩小,在施工难易和经济性上有不可比拟的优势。通过有限元分析计算,分析得出水泥粉煤灰基层混合料的高强度、低模量的优良力学性质对沥青面层反射裂缝及基层自身裂缝的形成和发展起到了良好的减轻和延缓作用,改善了路面结构的长期使用性能。^{[12][13]}

重庆交通大学的杨锡武教授等针对水泥粉煤灰混合料中路面基层的抗压、劈裂等强度特性展开了研究,试验结果显示,水泥(石灰)粉煤灰具有明显的早强效果,故在高级路面设计和施工中得到应用,对保证工期,提前开放交通,增强半刚性基层的抗疲劳能力,适应重型交通的发展是合理而有效的,并且粉煤灰的水泥稳定碎石抗裂性能优于二灰稳定碎石。在水泥粉煤灰稳定类混合料成型延迟时间研究方面,杨锡武教授等通过室内试验和试验路施工测试,研究了这种路面基层混合料的最长成型延迟时间,并用 X 衍射方法分析证明了水泥粉煤灰混合料中水泥水化进程减慢。^{[14][15]}

长安大学公路学院对水泥粉煤灰稳定碎石的级配和路用性能进行了一定的研究,沙爱民教授以水泥粉煤灰稳定碎石基层的级配范围为研究对象,以抗压强度为控制指标,依次给出适合用水泥粉煤灰稳定的连续级配范围和间断级配范围。张嘎吱提出了水泥粉煤灰稳定碎石作为基层和底基层时结合料与集料的最佳比例范围以及强度标准,并提出了悬浮骨架-密实结这一种全新的级配组成结构。通过温度应力指标分析不同类型半刚性基层的稳定性,结果表明水泥稳定碎石温度应力最大,水泥粉煤灰稳定碎石基层次之,石灰粉煤灰稳定碎石基层温度应力最小。徐江萍等研究分析了水泥粉煤灰稳定碎石的强度特点及规律,得出胶结料不变情况下,水泥粉煤灰稳定碎石的强度随着集料增加呈下降趋势及水泥粉煤灰稳定碎石使用间断级配强度高于连续级配的结论。^{[16][17]}

1.3 课题主要研究内容

本文主要针对黔北电厂粉煤灰用作路面半刚性基层材料时的路用性能进行研究。

主要内容如下：

- ① 黔北电厂粉煤灰的物理化学性质分析
- ② 水泥粉煤灰稳定碎石和石灰粉煤灰稳定碎石混合料的配合比设计
- ③ 混合料力学性能研究：抗压强度、劈裂强度、回弹模量；
- ④ 混合料强度影响因素分析；
- ⑤ 混合料稳定性能：水稳定性、抗冻稳定性；
- ⑥ 混合料收缩性能：干燥收缩、温度收缩；
- ⑦ 混合料收缩影响因素分析

通过室内试验和理论分析，分析了黔北电厂粉煤灰的物理化学性质，系统研究了黔北电厂粉煤灰的水泥粉煤灰稳定碎石和石灰粉煤灰稳定碎石的力学性能、水稳定性和抗冻性能、收缩性能等几种主要的路用性能，全面分析了黔北电厂粉煤灰的水泥粉煤灰稳定碎石和石灰粉煤灰稳定碎石的强度形成机理、收缩机理、强度形成的影响因素和收缩的影响因素，为黔北电厂粉煤灰用作路面基层材料提供试验数据参考。

第二章 黔北电厂粉煤灰稳定碎石混合料的力学性能研究

2.1 原材料性质

2.1.1 水泥

本文试验采用的水泥是重庆拉法基水泥厂生产的 32.5 级普通硅酸盐水泥,其熟料组成见表 2.1 (厂家提供),基本性能试验结果见表 2.2。

表 2.1 水泥熟料组成

Table 2.1 chemical compositions of cement

矿物名称	含量 (%)	矿物名称	含量 (%)
Fe ₂ O ₃	2.75	CaO	54.56
SiO ₂	22.91	K ₂ O	0.72
Al ₂ O ₃	6.81	Na ₂ O	0.16
MgO	2.62	SO ₃	1.77

表 2.2 水泥的基本性能试验结果

Table 2.2 the basal performance test results of cement

项 目	试 验 值
细 度	3.4 %
初凝时间	305min
终凝时间	430min

2.1.2 石灰

石灰质量应符合Ⅲ级消石灰或Ⅲ级生石灰的技术指标,并尽可能地选用等级较高的石灰。因为一是在相同剂量下,等级高的石灰有更多的活性氧化物,稳定效果更好;二是石灰等级愈高,其细度愈大,表面积就越大,与粉煤灰作用就越充分,稳定效果就越好;三是在满足一定活性氧化物的前提下,可以减少石灰用量,提高石灰粉煤灰稳定碎石抗干缩能力,减少干缩裂缝。

用于石灰粉煤灰稳定碎石基层的石灰技术指标应符合表 2.3 要求:

表 2.3 规范要求石灰技术指标^[11]

Table 2.3 the performance requirement of lime from the criterion

技术指标	材料种类			
	钙质生石灰	镁质生石灰	钙质消石灰	镁质消石灰
有效氧化钙加氧化镁含量 (%) 不小于	70	65	55	50

试验中所用消石灰的主要技术品质见表 2.4:

表 2.4 试验中消石灰的主要技术品质

Table 2.4 Main performance of lime in the tests

项目	CaO	MgO	CaO + MgO (%)	石灰等级
消石灰	83.16	3.96	87.12	I

2.1.3 黔北电厂粉煤灰的物理化学性质

《公路路面基层施工技术规范 JTJ034-2000》^[12]规定:路面基层使用粉煤灰时,要求粉煤灰中 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 的总含量应大于 70%,粉煤灰的烧失量不应超过 20%;粉煤灰的比表面积宜大于 $2500\text{cm}^2/\text{g}$ (或 90%通过 0.3mm 筛孔,70%通过 0.075mm 筛孔)。^{[18][19]}

1) 化学成分

黔北电厂粉煤灰的化学成分如表 2.5:

表 2.5 黔北电厂粉煤灰化学成分

Table 2.5 the chemical composition of the fly-ash from Qianbei Power Plant

化学成分	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	其他
质量百分数 (%)	43.23	22.46	9.83	2.13	3.25	1.4	19.1

我国《公路路面基层施工技术规范 JTJ034-2000》规定:粉煤灰中 $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ 的含量应大于 70%。由以上化学成分分析可知,黔北电厂粉煤灰主要化学成分 $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ 总含量达到 75.52%,品质较高,完全符合规范要求。

2) 烧失量

粉煤灰中普遍存在为燃烧充分的碳分。未燃碳分的含量与煤的来源、煤粉的加工条件、锅炉类型、电厂负荷等很多因素有关,因此不同粉煤灰中残留碳分含量差异比较大。我国粉煤灰中的未燃碳分范围在 1.2%~23.6%之间。

粉煤灰中残留碳分通常采用烧失量来表示,虽然对于某些粉煤灰,烧失量与粉煤灰中残留碳分的实际值并不完全相符,但一般情况下可认为粉煤灰的烧失量高低反映了碳分的高低,因为烧失量绝大部分源于残留碳分,粉煤灰的烧失量越大,残留碳分必然越高,而相比之下其他因素对粉煤灰烧失量贡献较小。所以通常粉煤灰的烧失量能较好地反映粉煤灰含碳量的高低。

我国《公路路面基层施工技术规范 JTJ034-2000》规定:粉煤灰的烧失量不应超过 10%。按照《GBT 1996-2005 用于水泥混凝土中的粉煤灰》烧失量测定方法对黔北电厂粉煤灰的烧失量进行了测定,结果见表 2.6:

表 2.6 黔北电厂粉煤灰烧失量

Table2.6 the fly loss on ignition of the fly-ash from Qianbei Power Plant

试样	第一组	第二组	第三组
烧失量 (%)	5.6	6.1	5.4
平均值 (%)	5.7		
等级	II		

试验结果显示,三组黔北电厂粉煤灰试样的最大烧失量为 6.1%,最小 5.4%,平均值为 5.7%,均符合《公路路面基层施工技术规范 JTJ034-2000》中粉煤灰的烧失量不应超过 10%的要求。

3) 液、塑限

试验所用黔北电厂粉煤灰的液、塑限测量结果表 2.7:

表 2.7 黔北电厂粉煤灰液、塑限

Table2.7 the liquid limit and plastic limit of the fly-ash from Qianbei Power Plant

试样	第一组	第二组	第三组	第四组	平均值
液限 (%)	29.3	28.8	29.9	28.5	29.1
塑限 (%)	43.6	42.9	43.8	43.2	43.4
塑性指数	14.3	14.1	13.9	14.7	14.3

结果表明,粉煤灰液、塑限都比较大,而塑性指数却很小,可见粉煤灰本身空隙中储存着不起增塑作用的水分。

4) 密度

粉煤灰的密度变化范围比较大。黔北电厂粉煤灰密度测量结果如下表 2.8:

表 2.8 黔北电厂粉煤灰密度

Table 2.8 the density of the fly-ash from Qianbei Power Plant

试样	第一组	第二组	第三组	第四组	第五组	平均范围
松散密度 (g/cm^3)	0.92	0.83	1.02	0.96	1.17	0.83~1.17

5) 需水量比

需水性对于粉煤灰的很多工程应用都是非常重要的物理性能指标。粉煤灰的需水量，可以定义为粉煤灰和水的混合物达到某一流动度的情况下所需的用水量，粉煤灰的需水量越小，相应的工程利用价值就越高。

工程应用中通常用需水量比来表示粉煤灰的需水性，黔北电厂粉煤灰需水量比如表 2.9 所示：

表 2.9 黔北电厂粉煤灰需水量比

Table 2.9 the water demand of the fly-ash from Qianbei Power Plant

试样	需水量比	平均	等级
第一组	96	97.7	II
第二组	98		
第三组	99		

粉煤灰的需水量指标可以综合反映粉煤灰的颗粒形貌、级配等情况。很显然，粉煤灰中表面光滑的球形颗粒越多，相应的需水量越小，而粉煤灰中多孔的颗粒越多，需水量越大。可见粉煤灰的细度、比表面积、需水量比之间存在着紧密联系。

6) 颗粒级配

采用标准筛对黔北电厂粉煤灰颗粒级配进行测量，结果见表 2.10：

表 2.10 黔北电厂粉煤灰颗粒级配

Table 2.10 Particle size distribution of the fly-ash from Qianbei Power Plant

孔径 (mm)	2~0.075	0.075~0.005	≤ 0.005
通过率 (%)	64.8	30	1.8

黔北电厂粉煤灰的颗粒大小表明，砂粒(2~0.075mm)占 64.8%，粉粒(0.075~0.005mm)占 30% 粘粒($\leq 0.005\text{mm}$)占 1.8%。可见，试验所用粉煤灰就其颗粒大小

及颗粒组成而言,粉煤灰中主要以粉粒为主,粘粒为次;由于粉煤灰中粉粒、粘粒的自硬性和毛细水的表面张力,其强度特性将表现出一定的粘聚力,但较小。

2.1.4 石料

本文试验采用的石料是重庆南岸区的具有一定级配的人工轧制石灰岩碎石,最大粒径 31.5mm。《公路路面基层施工技术规范 JTJ034-2000》规定,用于高速公路和一级公路路面基层的石料压碎值不大于 30%,二级和二级以下公路路面基层石料压碎值不大于 35%。本文试验用碎石检验结果见表 2.11:

表 2.11 碎石的检验结果

Table 2.11 the test result of crushed-stones

检验指标	压碎值(%)	针片状含量(%)
检验结果	18.4	5.10

2.2 混合料的配合比设计

进行配合比设计的目的是为了合理地确定混合料的各组成成分的用量,使得组成的混合料具有良好的结构性能和强度性能,并能满足其作为结构层的一些基本的要求。因此,混合料的配合比设计的好坏,将直接影响所设计的结构层的强度、使用质量和使用寿命。

由于在水泥粉煤灰稳定碎石中,发生化学反应的粉煤灰较少,而大部分粉煤灰作为细集料填充空隙,在配合比设计时将粉煤灰当成细集料考虑,使得火山灰化学反应在粉煤灰颗粒表面进行,这样既可以提高混合料的密实性,又能够增强整体强度,特别是后期半刚性基层的板体强度。^[20]为了研究水泥(石灰)与粉煤灰的比例变化、集料含量的变化对稳定碎石强度的影响,本文采用了多种配合比进行试验。

2.2.1 水泥(石灰)与粉煤灰的比例

①水泥粉煤灰比例的确定

水泥粉煤灰稳定基层在应用中缺乏相应的技术规定。各工程一般按水泥稳定基层的强度标准进行配合比设计。实际上水泥粉煤灰稳定类材料的强度发展特征介于水泥稳定和石灰粉煤灰稳定的情况之间,即早期强度高于石灰粉煤灰稳定而低于水泥稳定;后期强度发展幅度高于水泥稳定而低于石灰粉煤灰稳定。

我们认为水泥与粉煤灰的比例是集料性质、粉煤灰性质和要求的混合料强度增长率的函数。从水泥与粉煤灰的作用来看:在水泥粉煤灰稳定碎石混合料中,水泥粉煤灰既起填充集料空隙的作用,又起粘结作用。水泥中有硅酸三钙、硅酸二钙、铝酸三钙及铝酸二钙与水反应,产生氢氧化钙;这样粉煤灰中的氧化硅和

氧化铝都要与之发生火山灰反应。

水泥粉煤灰稳定类基层材料的强度随着水泥的剂量增大而增大。由相关试验结果,从基本强度要求和抗冲刷角度考虑,水泥剂量不宜低于3%。水泥用量多强度固然高,但不仅造成成本高,而且容易产生收缩裂缝,降低路面的使用寿命,虽然水泥粉煤灰稳定时的收缩性要好与单纯水泥稳定时的情形,但从强度和收缩性角度综合考虑,水泥剂量不宜大于7%;粉煤灰用量过多,则会有部分过量的粉煤灰未能参加反应,而且因为水泥比例太低,施工中不易拌和均匀,水泥粉煤灰的结合料性能不能充分发挥,这些都不利于水泥粉煤灰稳定碎石基层的刚度和整体性。因此,水泥与粉煤灰的比例选择是否得当,将直接影响水泥粉煤灰稳定碎石混合料内部的反应程度,进而对水泥粉煤灰稳定碎石的一系列性能产生影响。

②石灰粉煤灰比例的确

石灰和粉煤灰是二灰碎石混合料的主要粘结力来源。通常情况下,二灰中石灰含量的增加促进了粉煤灰的水化反应,有利于提高二灰的强度。但是,石灰含量过高就会出现过剩的自由石灰,导致材料总体强度降低,同时,石灰的含量偏高会使生成的水化产物的收缩加大。此外,粉煤灰的活性成分含量的多少及粉煤灰颗粒的粗细程度对二灰混合料的强度都有一定的影响。因此,在石灰与粉煤灰之间存在一个最佳的配比,在这个配比下二灰混合料的性能最优。

在本课题中,考虑到质量和经济的原因,以及考虑充分发挥水泥粉煤灰的粘结性,采用3:27、3:22、3:17、3:12和4:21几种水泥粉煤灰比例,采用4:26、4:21、4:16、4:11几种石灰粉煤灰比例,通过重型击实试验确定水泥(石灰)粉煤灰稳定碎石混合料的最大干密度和最佳含水量,据此成型 $\phi 15 \times h15\text{cm}$ 的圆柱体试件,测试其7d无侧限抗压强度,选取抗压强度满足规范要求时对应的水泥(石灰)粉煤灰配比作为后续试验的配合比,研究水泥(石灰)掺量较低情况下水泥(石灰)粉煤灰稳定碎石的路用性能。

表2.12 混合料配合比设计表

Table 2.12 Mix Design Table

水泥粉煤灰稳定碎石				石灰粉煤灰稳定碎石			
编号	各组成材料含量 (%)			编号	各组成材料含量 (%)		
	水泥	粉煤灰	碎石		石灰	粉煤灰	碎石
C1	3	27	70	L1	4	26	70
C2	3	22	75	L2	4	21	75
C3	3	17	80	L3	4	16	80
C4	3	12	85	L4	4	11	85
C5	4	21	75				

2.2.2 水泥（石灰）粉煤灰与集料之间的比例确定

水泥（石灰）与粉煤灰的含量与许多因素有关，水泥（石灰）和粉煤灰是水泥（石灰）粉煤灰稳定碎石的结合料，它赋予了水泥（石灰）粉煤灰稳定碎石的半刚性性质。水泥（石灰）粉煤灰含量过多，易使材料温缩和干缩过大，致使混合料的抗裂性和耐久性降低。而水泥粉煤灰含量过少，则难以填满骨料间的空隙，使结构层的强度、板体性无法得到保证。

此外，为保证水泥（石灰）粉煤灰稳定碎石半刚性基层的强度和良好的收缩性，确定其集料的最佳比例范围也是很必要的。并且集料比例过大，施工中易产生离析现象，比例过低易产生收缩裂缝。

此处借鉴二灰碎石混合料的配合比经验来选取水泥加粉煤灰与集料之间的比例，即考虑将二灰碎石混合物中的石灰加粉煤灰替换为水泥加粉煤灰。在我国通常使用两种类型石灰粉煤灰集料混合物，一种是密实式的，即集料含量占80%~85%，具有规定的级配。石灰加粉煤灰含量为20%~12%，起填充集料空隙和粘结作用；另一种是悬浮式，即集料仅占50%~60%左右，不要求集料具有一定级配，集料悬浮于石灰和粉煤灰混合物之间，该类型混合物施工方便。就抗冲刷能力和收缩性能而言，密实式混合物明显优于悬浮式混合物。依据已有研究成果，当集料含量为60%~80%时，随着集料含量的增加，混合物的抗压强度也随之增加，但集料含量超过80%时，其抗压强度反而随之降低。

鉴于以上原因和已有二灰碎石混合物的经验，以及时间的关系，本课题只采用集料含量在70%~85%的密实型水泥（石灰）粉煤灰稳定碎石混合物，考察在此范围内黔北电厂粉煤灰作为半刚性基层结合料的路用性能。

2.2.3 集料级配设计

一般来说，具有良好级配的集料与适当比例的水泥（石灰）粉煤灰在最佳含水量状态下经均匀拌和而成的混合物，通过机械压实及养生后可形成性能优良的水泥（石灰）粉煤灰稳定碎石基层。

为了使级配碎石具有较高的强度和刚度，首先要严格选材，控制碎石原材料强度、压碎值、集料中 0.5mm 细料的塑性指数以及集料针片状含量指标在规定范围内，同时确保集料干净，其次是控制级配组成，这是取得良好嵌挤力，达到高密度、高强度和具有良好透水性等的关键因素。

集料的级配可分为连续级配和间断级配。

连续级配是集料在标准筛孔配成的套筛中进行筛析时，所得的级配曲线平顺圆滑，具有连续的(不间断的)性质，相邻粒径的颗粒之间，有一定的比例关系。这种由大到小，各级粒径均有，并按比例互相搭配组成的矿质级配。

间断级配是集料中缺少一级或几个粒级的颗粒，大小颗粒间有较大的“空档”

的非连续集料级配。大骨料空隙由小几倍的小粒径颗粒填充，降低了集料空隙率。

通常，连续级配集料的空隙率随着粗集料的增加而显著增加；间断级配集料能较好地发挥粗集料的骨架作用，但在施工中易于离析。^[21]

半刚性基层混合料中，以结合料填充集料空隙并包裹集料。所以，集料空隙越大，填充集料颗粒空隙所需的结合料越多；集料的总表面积越大，包裹集料颗粒所需的结合料越多。从节约结合料的角度考虑，最好采用空隙较小，总表面积也较小的集料。此外，若各粒级集料颗粒在相互排列时，能够相互嵌锁又不互相干涉，形成紧密多级嵌挤的空间骨架结构，则集料颗粒间将具有较大的内摩阻力。^[22]因此，本课题采用间断级配的骨架密实结构，以使混合料能够达到最优的强度、耐久性及施工和易性。

1993年《公路路面基层施工技术规范 JTJ 034-93》^[23]规定集料的最大粒径不应超过 30mm（圆孔筛），并认为当二灰与集料的质量比控制在 15: 85~20: 80 之间时，集料可以起到骨架作用，而二灰则可以起到填充作用，从而使混合料具有较高的密实度，形成密实骨架结构，以期提高强度，减小其收缩，提高其抗冲刷能力。然而，基层施工规范中所规范的二灰稳定碎石混合料粗集料含量偏少和 4.75mm 以下集料含量过大，从而导致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破坏。

2000年颁布的《公路路面基层施工技术规范 JTJ 034-2000》中推荐二灰稳定碎石的集料级配采用方孔标准筛，并对各筛孔的集料通过量进行了调整。但相对 1993年规范的二灰稳定碎石结构特性并未产生质的变化。

表 2.13 规范 JTJ 034-2000 骨架密实型石灰粉煤灰稳定集料级配参考表

Table 2.13 Gradation of the lime and fly-ash stabilized aggregate with the skeleton dense type from the criterion JTJ 034-2000

通过下列方筛孔 (mm) 的质量百分率 (%)									
筛孔尺寸	31.5	26.5	19.0	9.50	4.75	2.36	1.18	0.6	0.075
通过率	100	95~100	48~68	24~34	11~21	6~16	2~12	0~6	0~3

试验中 2.36mm 以下粒径的细集料全部用水泥（石灰）粉煤灰代替，以保证集料的骨架密实作用，防止过多细集料形成悬浮结构而影响混合料的性能，所用集料各粒径含量如表 2.14:

表 2.14 集料各粒径含量表

Table 2.14 Quantity of crushed-stone in each size

规范	筛孔尺寸 (mm)	31.5	26.5	19	9.5	4.75	2.36
要求	通过率 (%)	100	95-100	48-68	24-34	11-21	6-16
规范级配上限		100	100	68	34	21	16
规范级配中值		100	97.5	58	29	16	11
规范级配下限		100	95	48	24	11	6
设计级配		100	96.25	49.25	32	14	0
累计筛余		0	3.75	50.75	68	86	100
分计筛余		0	3.75	47	17.25	18	14

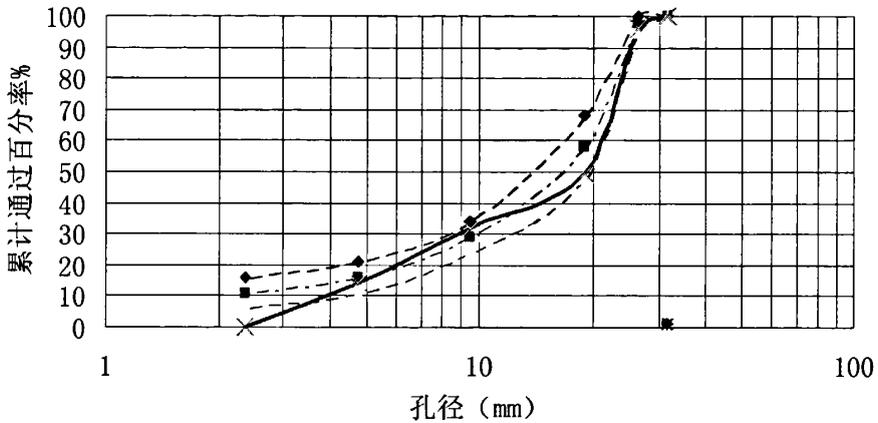


图 2.1 级配曲线

Fig 2.1 Gradation curve

2.3 粉煤灰混合物料试件成型参数的确定

在检验半刚性基层各项路用性能时,应首先进行无机结合料稳定材料的击实试验,以确定混合料的最佳含水量和最大干密度,为其他试验提供指导。

2.3.1 实验方法

根据集料的粒径范围,本实验采用干土法重型击实实验测量混合料的最佳含水量和最大干密度。试筒尺寸(内径15.2cm,高12cm),分三层击实,每层击实98次,击实功 2677.2kJ/m^3 。

① 试验步骤

a. 将已过筛的试料用四分法逐次分小,至最后取出约 33Kg 试料。再用四分法将取出的试料分成 5 份,每份重约 5.5Kg。

b. 预定 5~6 个不同含水量,依次相差 1%~2%。在估计的最佳含水量左右可

只差 1%，其余差 2%。

c. 遵照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程 (JTJ057-94)》按预定含水量制备试样，将混合料拌和均匀，将试筒、套环与夯击底板紧密地连接在一起，并将垫块放在筒内底板上。击实筒应放在坚实地面上，取之备好的试样 1.8Kg 左右倒入筒内，整平其表面，并稍加压紧。然后按照所需击数进行第一层试样的击实 98 次。击实时，击锤应自由铅直落下，落高应为 45cm，锤迹必须均匀分布于试样面。第一层击实完后，检查该层的高度是否合适，以便调整以后几层的试样用量。用刮土刀或改锥将已击实的表面“拉毛”，然后重复上述做法，进行其余几层试样的击实。最后一层试样击实后，试样超出试筒顶的高度不得大于 6mm，超出高度大的试样应该作废。

d. 用刮土刀沿套环内壁削挖（使试样与套环脱离）后，扭动并取下套环。对齐筒顶细心刮平试样，并拆除底板，取走垫块。擦净试筒的外壁，称重，准确至 5g。

e. 用脱模器推出筒内试样。自试样内部从上到下取 2 个具有代表性的样品（可将脱出试样用锤打碎后，用四分法采取），测定其含水量，计算至 0.1%。2 个试样含水量的差值不得大于 1%。所取样品的数量应不少于 700g，如只取一个样品测定含水量，则样品的数量应不少于 1400g。烘箱的温度应事先调整到 110℃ 左右，以使放入的试样能立即在 105~110℃ 的温度下烘干。

f. 按上述 a~e 项进行其余含水量下稳定土的击实和测定。

凡用过的试样，一律不再重复使用。^[24]

② 试验结果整理

1) 按下式计算击实后各点的干密度：

$$\rho_d = \rho / (1 + 0.001 \omega) \quad (2.1)$$

式中： ρ_d --干密度， g/cm^3 ；

ρ --湿密度， g/cm^3 ；

ω --含水量，%。

2) 以干密度为纵坐标，含水量为横坐标，绘制干密度与含水量的关系曲线，曲线上峰值点的纵、横坐标分别为最大干密度和最佳含水量，如曲线不能绘出明显的峰值点，应进行补点或重做。

3) 按下式计算空气体积等于零的等值线，并将这根线绘在含水量与干密度的关系图上，以资比较。

$$\rho_d = (1 - 0.01 V_a) / (1/G_s + \omega / 100) \quad (2.2)$$

式中： ρ_d --试样的干密度， g/cm^3 ；

V_a --空气体积，%；

G_s --试样比重, 对于粗粒土, 则为土中粗细颗粒的混合比重;

ω --试样的含水量, %。

4) 当试样中有大于38 mm颗粒时, 应先取出大于38 mm颗粒, 并求得其百分率 P , 把小于38 mm部分作击实试验, 按下面公式分别对试验所得的最大干密度和最佳含水量进行校正(适用于大于38 mm颗粒的含量小于30%时)。

最大干密度按下式校正:

$$\rho'_{dm} = 1 / [(1 - 0.01P) / \rho_{dm} + 0.01P / G_s'] \quad (2.3)$$

式中: ρ'_{dm} --校正后最大干密度, g/cm^3 ;

ρ_{dm} --用粒径小于38 mm的土样试验所得的最大干密度, g/cm^3 ;

P --试料中粒径大于38 mm颗粒的百分数, %;

G_s' --粒径大于38 mm颗粒的毛体积比重, 计算至0.01。

最佳含水量按下式校正:

$$\omega_0' = \omega_0(1 - 0.01P) + 0.01P\omega_2 \quad (2.4)$$

式中: ω_0' --校正后的最佳含水量, %;

ω_0 --用粒径小于38 毫米的土样试验所得的最佳含水量, %;

P --试料中粒径大于38 mm颗粒的百分数, %;

ω_2 --粒径大于38 毫米颗粒的吸水量, %。

2.3.2 最佳含水量和最大干密度试验结果

通过重型击实试验, 得到了几种粉煤灰稳定混合料的最佳含水量和最大干密度, 如表 2.15 所示:

表 2.15 最佳含水量和最大干密度试验数据

Table 2.15 Test results of optimum moisture content and maximum dry density

混合料类型	代号	配合比	最大干密度 (g/cm^3)	最佳含水量 ω (%)
水泥粉煤灰稳定碎石 C: F: S	C1	3: 27: 70	2.213	6.9
	C2	3: 22: 75	2.276	6.1
	C3	3: 17: 80	2.333	5.4
	C4	3: 12: 85	2.379	4.7
	C5	4: 21: 75	2.291	6.0
石灰粉煤灰稳定碎石 L: F: S	L1	4: 26: 70	2.147	8.2
	L2	4: 21: 75	2.205	7.1
	L3	4: 16: 80	2.250	6.5
	L4	4: 11: 85	2.304	6.1

注: 表中 C 代表水泥; L 代表石灰; F 代表粉煤灰; S 代表碎石

2.4 水泥（石灰）粉煤灰稳定碎石的强度性能

路面基层必须能承受车轮荷载的反复作用，即在预定设计标准轴载反复作用下，基层不会产生过多的残余变形，更不会产生剪切破坏（无结合料的粒料基层）或疲劳弯拉破坏（用各种结合料处治的基层）。基层要满足上述技术要求，除必须的厚度外，主要取决于基层材料本身的强度和刚度。本节通过对水泥（石灰）粉煤灰稳定碎石两种类型的半刚性材料在不同组合、不同龄期的条件下进行试验研究，得到了水泥（石灰）粉煤灰稳定碎石的无侧限抗压强度、劈裂强度随配合比、龄期变化而变化的规律及各相关参数之间的关系。

2.4.1 无侧限抗压强度和劈裂强度试件制备及测试方法

①无侧限抗压强度试验试件的制备及测试方法

试验中的试件由压力机静压成型。本论文采用的试验设备是由我国无锡生产的 NYL2000 型压力试验机（如下图），最大加载能力为 2000KN。试件的制备和养生按《公路工程无机结合料稳定材料试验规程（JTJ057-94）》规定的方法进行，抗压强度所用试件规格均为：直径×高=150mm×150mm。

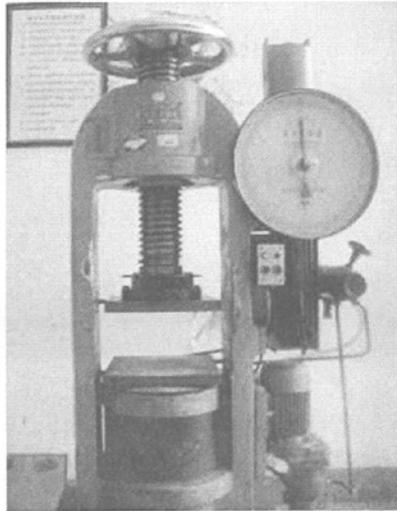


图 2.2 NYL2000 型压力试验机

Fig 2.2 NYL2000 pressure testing machine

抗压强度的测定按《公路工程无机结合料稳定材料试验规程 JTJ057-94》规定的方法进行，试验设备及试验过程分别如下图 3.3、3.4 所示。

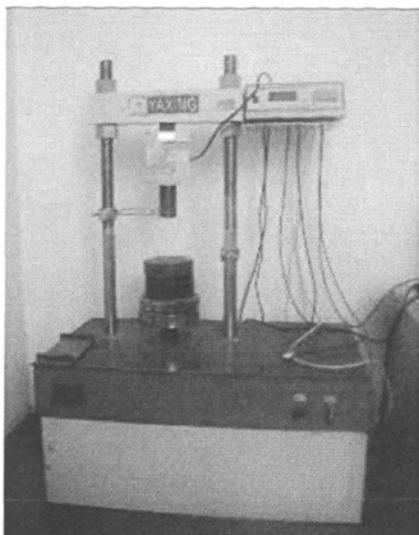


图 2.3 路基路面强度测试仪

Fig 2.3 Pavement Subgrade Strength Tester

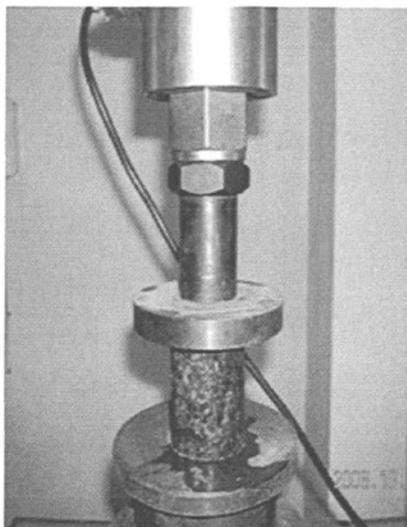


图 2.4 无侧限抗压强度试验

Fig 2.4 test of unconfined compressive strength

1) 试验步骤

a. 将已浸水一昼夜的试件从水中取出, 用软的旧布吸去试件表面的可见自由水, 并称试件的质量;

b. 用游标卡尺量试件的高度, 准确到 0.1mm;

c. 将试件放到电子式万能试验机上(台上先放一扁球座), 进行抗压试验。试验过程中, 应使试件的形变等速增加, 并保持速率约为 1mm/min。纪录试件破坏时的最大压力;

d. 从试件内部取有代表性的样品(经过打破)测定其含水量。

2) 无侧限抗压强度的计算方法

抗压强度 R_c 按下式计算:

对于直径 \times 高=150mm \times 150mm 试件:

$$R = \frac{P}{A} = 0.00057P \quad (\text{MPa}) \quad (2.5)$$

式中: P —试件破坏时的最大压力 (N);

A —试件的截面面积 ($A = \frac{\pi}{4} D^2$, D 为试件直径, 单位 mm)。

抗压强度满足的要求是:

$$\bar{R} \geq R_d / (1 - Z_x \cdot C_v) \quad (2.6)$$

式中: \bar{R} —抗压强度平均值, $\bar{R} = \frac{R_1 + R_2 + \dots + R_n}{n}$ (R_1, R_2, \dots, R_n 为每个试件

的强度值, n 为试件数);

C_v —试验结果的偏差系数 (以小数计)

$$C_v = \frac{S}{R} \quad (S \text{ 为样本标准差 } S = \sqrt{\frac{(R_1 - \bar{R})^2 + (R_2 - \bar{R})^2 + \dots + (R_n - \bar{R})^2}{n-1}});$$

R_d —设计抗压强度 (MPa);

Z_x —标准正态分布表中随保证率而变的系数, 对于二级以下县乡公路保证率取 90%, $Z_x = 1.282$ 。

3) 试验结果精密度或允许误差

对于 150mm×150mm 的试件, 若干次平行试验的偏差系数 C_v (%) 应不大于 20%。

② 劈裂强度试验试件的制备及测试方法

试件的制备和养生同无侧限抗压强度试验, 劈裂强度的试件规格为: 直径×高=150mm×150mm, 劈裂强度的测定按《公路工程无机结合料稳定材料试验规程 (JTJ057-94)》规定的方法进行。

1) 试验步骤

- a. 将已浸水一昼夜的试件从水中取出, 用软的旧布吸去试件表面的可见自由水, 并称试件的质量;
- b. 用游标卡尺量试件的高度 H , 准确到 0.1mm;
- c. 将试件放到电子式万能试验机上, 进行劈裂强度试验。试验过程中, 应使试件的形变等速增加, 并保持速率约为 1mm/min。纪录试件破坏时的最大压力 P ;
- d. 从试件内部取有代表性的样品 (经过打破) 测定其含水量。

2) 劈裂强度的计算方法

对于 $\phi 150\text{mm} \times H150\text{mm}$ 试件, 有压条时, 劈裂强度 R_i 按下式计算:

$$R_i = \frac{2P}{\pi dH} = 0.004178 \frac{P}{H} \quad (\text{MPa}) \quad (2.7)$$

式中: P —试件破坏时的最大压力 (N);

d —试件的直径 (mm);

H —试件浸水后高度 (mm)。

3) 试验结果精密度或允许误差

若干次平行试验的偏差系数 C_v (%) 应不大于 20%。

2.4.2 无侧限抗压强度和劈裂强度试验结果

表 2.16 7 天龄期水泥（石灰）粉煤灰稳定碎石劈裂、抗压强度汇总表

Table 2.16 7d unconfined compressive strength and crack strength of cement (lime) and fly-ash stabilized crushed stones

水泥 粉煤 灰稳 定碎 石	编号	配合比	水泥/粉 煤灰	劈裂强度 (MPa)	偏差系数 Cv(%)	抗压强度 (MPa)	偏差系数 Cv(%)
	C1	3: 27: 70	3: 27	0.5014	8.33	4.1468	8.26
C2	3: 22: 75	3: 22	0.4132	3.91	4.4952	8.39	
C3	3: 17: 80	3: 17	0.3479	7.38	3.6147	9.13	
C4	3: 12: 85	3: 12	0.3330	5.15	3.5103	13.35	
C5	4: 21: 75	4: 21	0.5282	13.85	4.7641	0.96	
石灰 粉煤 灰稳 定碎 石	编号	配合比	石灰/粉 煤灰	劈裂强度 (MPa)	偏差系数 Cv(%)	抗压强度 (MPa)	偏差系数 Cv(%)
	L1	4: 26: 70	4: 26	0.0497	17.07	0.5155	13
L2	4: 21: 75	4: 21	0.0556	10.2	0.7155	14.58	
L3	4: 16: 80	4: 16	0.0506	15.69	0.9666	10.66	
L4	4: 11: 85	4: 11	0.0405	10.77	0.8252	9.02	

表 2.17 28 天龄期水泥（石灰）粉煤灰稳定碎石劈裂、抗压强度汇总表

Table 2.17 28d unconfined compressive strength and crack strength of cement (lime) and fly-ash stabilized crushed stones

水泥 粉煤 灰稳 定碎 石	编号	配合比 (C:F:S)	水泥/ 粉煤灰	劈裂强度 (MPa)	偏差系数 Cv(%)	抗压强度 (MPa)	偏差系数 Cv(%)
	C1	3: 27: 70	3: 27	0.7091	18.96	4.9727	13.45
C2	3: 22: 75	3: 22	0.706	7.02	5.0984	2.22	
C3	3: 17: 80	3: 17	0.6956	19.69	5.5678	3.83	
C4	3: 12: 85	3: 12	0.5594	14.55	4.8841	11.36	
C5	4: 21: 75	4: 21	0.7208	13.32	7.7710	5.97	
石灰 粉煤 灰稳 定碎 石	编号	配合比 (L:F:S)	石灰/ 粉煤灰	劈裂强度 (MPa)	偏差系数 Cv(%)	抗压强度 (MPa)	偏差系数 Cv(%)
	L1	4: 26: 70	4: 26	0.1015	6.40	1.7305	3.73
L2	4: 21: 75	4: 21	0.1045	1.89	1.7550	5.70	
L3	4: 16: 80	4: 16	0.1783	10.08	2.1671	16.59	
L4	4: 11: 85	4: 11	0.2209	9.67	2.1044	13.55	

表 2.18 90 天龄期水泥（石灰）粉煤灰稳定碎石劈裂、抗压强度汇总表

Table 2.18 90d unconfined compressive strength and crack strength of cement (lime) and fly-ash stabilized crushed stones

水泥 粉煤 灰稳 定碎 石	编号	配合比 (C:F:S)	水泥/ 粉煤灰	劈裂强度 (MPa)	偏差系数 Cv(%)	抗压强度 (MPa)	偏差系数 Cv(%)
	C1	3:27:70	3: 27	0.7199	3.72	5.1870	3.11
	C2	3:22:75	3: 22	0.9018	12.83	7.9800	2.02
	C3	3:17:80	3: 17	0.8605	13.71	7.4955	6.99
	C4	3:12:85	3: 12	0.7380	8.94	7.4100	7.69
	C5	4:21:75	4: 21	0.9427	5.51	8.5500	9.43
石灰 粉煤 灰稳 定碎 石	编号	配合比 (L:F:S)	石灰/ 粉煤灰	劈裂强度 (MPa)	偏差系数 Cv(%)	抗压强度 (MPa)	偏差系数 Cv(%)
	L1	4:26:70	4: 26	0.3397	1.57	3.0970	11.09
	L2	4:21:75	4: 21	0.2256	0.52	3.2456	3.61
	L3	4:16:80	4: 16	0.4879	19.10	4.7051	13.29
	L4	4:11:85	4: 11	0.4757	8.47	4.3980	6.95

注：表中 C 代表水泥；L 代表石灰；F 代表粉煤灰；S 代表碎石

2.4.3 无侧限抗压强度和劈裂强度试验结果分析

1) 水泥粉煤灰稳定碎石抗压强度的规范要求

《公路沥青路面设计规范 JTG D50-2006》对水泥粉煤灰稳定类材料的压实度及 7d 无侧限抗压强度提出了要求，具体如表 2.19 所示：

表 2.19 《公路沥青路面设计规范 JTG D50-2006》水泥粉煤灰稳定类材料的压实度及 7d 无侧限抗压强度要求

Table 2.19 the unconfined compressive strength requirement of cement and fly-ash stabilized crushed-stones from the criterion 《Asphalt Pavement Design Parameters JTG D50-2006》

层位	类别	特重、重、中交通		轻交通	
		压实度 (%)	抗压强度 (MPa)	压实度 (%)	抗压强度 (MPa)
基层	集料	≥98	1.5~3.5	≥97	1.2~1.5
底基层	集料	≥97	≥1.0	≥96	≥0.6

由 7d 无侧限抗压强度试验结果可知，黔北电厂粉煤灰的水泥粉煤灰稳定碎石混合料的 7d 无侧限抗压强度范围为 3.5~4.8MPa，略高于《公路沥青路面设计规范 JTG D50-2006》中特重、重、中交通对水泥粉煤灰稳定碎石强度的要求，可见黔北电厂粉煤灰的水泥粉煤灰稳定碎石基层强度可满足各类交通需要，可用于修建各等级公路基层。

2) 石灰粉煤灰稳定碎石抗压强度的规范要求

表 2.20 《公路沥青路面设计规范 JTG D50-2006》石灰粉煤灰稳定类材料的压实度及 7d 无侧限抗压强度要求

Table 2.20 the unconfined compressive strength requirement of lime and fly-ash stabilized crushed-stones from the criterion 《Asphalt Pavement Design Parameters JTG D50-2006》

层位	类别	特重、重、中交通		轻交通	
		压实度 (%)	抗压强度 (MPa)	压实度 (%)	抗压强度 (MPa)
基层	集料	≥98	≥0.8	≥97	≥0.6
	细粒土	—	—	≥96	
底基层	集料	≥97	≥0.6	≥96	≥0.5
	细粒土	≥96		≥95	

由 7d 无侧限抗压强度试验结果可知, 黔北电厂粉煤灰的石灰粉煤灰稳定碎石混合料的 7d 无侧限抗压强度范围为 0.5~1.0MPa。其中 L1 (4:26:70) 的强度为 0.5MPa, 仅符合《公路沥青路面设计规范 JTG D50-2006》中轻交通石灰粉煤灰稳定类材料底基层的抗压强度要求, 适用范围很小; L2 (4:21:75) 的无侧限抗压强度为 0.7MPa, 符合规范中特重、重、中交通底基层和轻交通基层、底基层强度要求; L3 (4:16:80) 和 L4 (4:11:85) 的无侧限抗压强度均高于 0.8MPa, 符合各类交通的石灰粉煤灰稳定类材料基层和底基层强度要求。可见黔北电厂粉煤灰的石灰粉煤灰稳定碎石适用范围相对狭窄, 在进行基层配合比设计时, 应检验设计混合料的无侧限抗压强度以适用于对应交通量。

3) 无侧限抗压强度试验结果对比分析

不同龄期水泥(石灰)粉煤灰碎石混合料的无侧限抗压强度对比如图 2.8 所示:

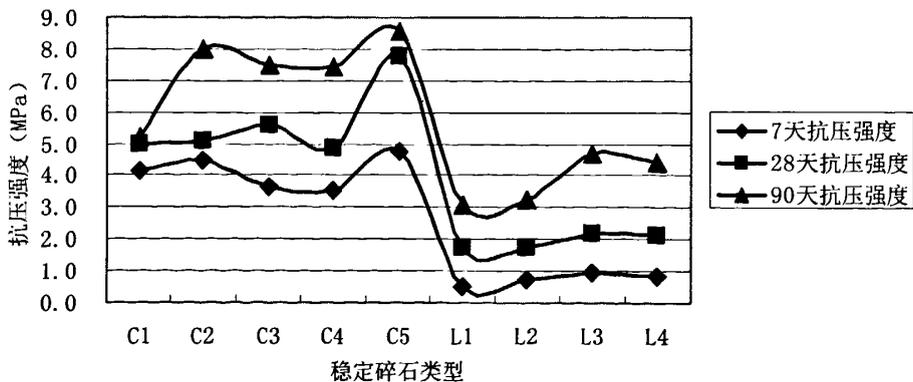


图 2.8 水泥(石灰)粉煤灰稳定碎石混合料无侧限抗压强度对比

Fig 2.8 Comparison between the unconfined compressive strength of cement(lime) and fly-ash stabilized crushed stones

表 2.21 7 天抗压强度、28 天抗压强度、90 天抗压强度对比(单位: MPa)

Table 2.21 Comparison between the 7d、28d、90d unconfined compressive strength (MPa)

龄期	水泥粉煤灰稳定碎石					石灰粉煤灰稳定碎石			
	C1	C2	C3	C4	C5	L1	L2	L3	L4
7 天	4.1468	4.4952	3.6147	3.5103	4.7641	0.5155	0.7155	0.9666	0.8252
28 天	4.9727	5.0984	5.5678	4.8841	7.7710	1.7305	1.7550	2.1671	2.1044
90 天	5.187	7.98	7.4955	7.41	8.55	3.097	3.2456	4.7051	4.3980
R28/R7	1.20	1.13	1.54	1.39	1.63	3.36	2.45	2.24	2.55
R90/R28	1.04	1.57	1.35	1.52	1.10	1.79	1.85	2.17	2.09

从上表可以看出:

(1) 四种配合比的水泥粉煤灰稳定碎石混合料, 在水泥用量不变(3%)的情况下, 水泥:粉煤灰(C:F)=1: 9~1~4, 水泥粉煤灰稳定碎石的 7 天无侧限抗压强度从 C1 到 C2 随着碎石含量的提高有所增长, 之后从 C2 到 C3、C4 无侧限抗压强度逐渐降低, 这是因为无机结合料与碎石之间存在一个使混合料强度最高的最佳比例, 随着碎石含量的提高, 所需无机结合料掺量也随着增加。C1→C2→C3→C4, 相对于碎石含量的提高, C3 和 C4 中水泥和粉煤灰含量逐渐降低, 从而引起混合料 7d 强度逐渐降低。7 天无侧限抗压强度在 C2 处, 即碎石含量为 75%(C:F=1: 7) 时达到最大, 28 天抗压强度在碎石含量为 80%(C:F=1: 6) 时达到最大, 90 天抗压强度在碎石含量为 75%(C:F=1: 7) 时达到最大; 同样的, 在石灰粉煤灰碎石混合料中存在着石灰粉煤灰与碎石之间的最佳比例。L1、L2、L3、L4 四种配合比的石灰粉煤灰稳定碎石混合料, 在石灰用量不变(4%)的情况下, 石灰:粉煤灰(L:F)=1: 7~1: 3, 石灰粉煤灰稳定碎石的 7 天、28 天、90 天无侧限抗压强度均在碎石含量为 80%(L:F=1: 4) 时达到最大。

(2) 随着养生龄期的延长, 水泥(石灰)粉煤灰稳定碎石的抗压强度也在不断增长, 但是各种配合比混合料的强度增长速度不同。28 天和 7 天抗压强度对比显示: 水泥粉煤灰稳定碎石 80% 碎石含量的混合料强度增长速度最快, 石灰粉煤灰稳定碎石 70% 碎石含量的混合料强度增长速度最快。90 天和 28 天强度对比显示: 水泥粉煤灰稳定碎石 75% 碎石含量的混合料强度增长速度最快, 石灰粉煤灰稳定碎石 80% 碎石含量的混合料强度增长速度最快。

(3) 水泥粉煤灰稳定碎石的抗压强度在最初 28 天里增长速度较快, 之后增长速度趋于平缓, 石灰粉煤灰稳定碎石的抗压强度在 28 天之后仍然保持着强劲的增长势头, 可见石灰粉煤灰稳定碎石的后期强度增加明显。

(4) 对比 C2 和 C5 的强度数据可以发现, 在水泥含量增加 1% 的情况下, 7

天龄期抗压强度增加幅度不大,但 28 天龄期抗压强度有大幅度增加,90 天龄期强度也有明显增长,可见水泥含量对抗压强度有直接影响。

(5) 对比 C5 和 L2 两类粉煤灰稳定碎石混合料,在碎石含量相同的条件下,前者加入了 4% 的水泥和 21% 的粉煤灰,后者加入了 4% 的石灰和 21% 的粉煤灰。无论是 7 天龄期、28 天龄期和 90 天龄期的抗压强度,水泥粉煤灰稳定碎石都要比石灰粉煤灰稳定碎石高的多,尽管水泥粉煤灰稳定碎石强度增长速度要低于石灰粉煤灰稳定碎石,可见在粉煤灰稳定碎石基层中用水泥代替石灰对路面抗压强度的提高是十分有利的。

4) 劈裂强度试验结果对比分析

不同龄期水泥(石灰)粉煤灰碎石混合料的劈裂强度对比如图 2.9 所示:

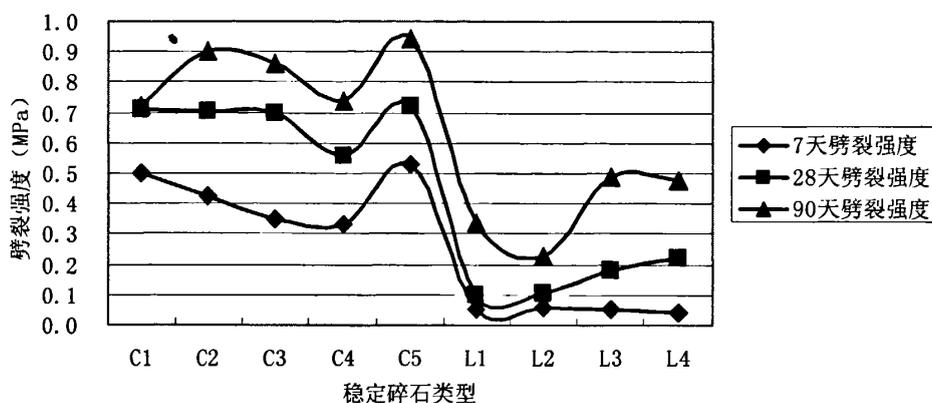


图 2.9 水泥(石灰)粉煤灰稳定碎石混合料劈裂强度对比

Fig 2.9 Comparison between the crack strength of cement(lime) and fly-ash stabilized crushed stones

表 2.22 7 天劈裂强度、28 天劈裂强度、90 天劈裂强度对比(单位: MPa)

Table 2.22 Comparison between the 7d、28d、90d crack strength(MPa)

龄期	水泥粉煤灰稳定碎石					石灰粉煤灰稳定碎石			
	C1	C2	C3	C4	C5	L1	L2	L3	L4
7 天	0.5014	0.4132	0.3479	0.3330	0.5282	0.0497	0.0556	0.0506	0.0405
28 天	0.7091	0.706	0.6956	0.5594	0.7208	0.1015	0.1045	0.1783	0.2209
90 天	0.7199	0.9018	0.8605	0.7380	0.9427	0.3397	0.2256	0.4879	0.4757
R28/R7	1.41	1.71	2.09	1.30	1.36	2.04	1.88	3.52	5.45
R90/R28	1.02	1.28	1.24	1.32	1.31	3.35	2.16	2.74	2.15

从上表可以看出:

(1) C1、C2、C3、C4 四种配合比的水泥粉煤灰稳定碎石混合料,在水泥用

量不变(3%)的情况下,水泥:粉煤灰(C:F)=1:9~1~4,水泥粉煤灰稳定碎石的7天和28天劈裂强度均在碎石含量为70%时达到最大,在碎石含量为85%时最小;90天劈裂强度先增加后减小,在碎石含量为75%时达到最大。L1、L2、L3、L4四种配合比的石灰粉煤灰稳定碎石混合料,在石灰用量不变(4%)的情况下,石灰:粉煤灰(L:F)=1:7~1:3,石灰粉煤灰稳定碎石的7天劈裂强度在碎石含量为75%时达到最大,28天劈裂强度随碎石含量增加(粉煤灰含量减少)逐渐上升,在碎石含量为85%时达到最大,90天劈裂强度在碎石含量为80%时达到最大。

(2)随着养生龄期的延长,水泥(石灰)粉煤灰稳定碎石的劈裂强度也在不断增长,但是各种配合比混合料的强度增长速度不同。28天和7天劈裂强度对比显示:水泥粉煤灰稳定碎石的劈裂强度在80%碎石含量时增长速度最快,石灰粉煤灰稳定碎石的劈裂强度在85%碎石含量时增长速度最快。90天和28天劈裂强度对比显示:水泥粉煤灰稳定碎石的劈裂强度在85%碎石含量时增长速度最快,石灰粉煤灰稳定碎石的劈裂强度在70%碎石含量时增长速度最快。

(3)对比C2和C5的强度数据可以发现,在水泥含量增加1%的情况下,7天龄期、28天龄期和90天龄期劈裂强度均有所增加,可见水泥含量对劈裂强度有直接影响。

(4)对比C5和L2两类粉煤灰稳定碎石混合料,在碎石含量相同的条件下,前者加入了4%的水泥和21%的粉煤灰,后者加入了4%的石灰和21%的粉煤灰。无论是7天龄期、28天龄期和90天龄期的劈裂强度,水泥粉煤灰稳定碎石都要比石灰粉煤灰稳定碎石高的多,尽管水泥粉煤灰稳定碎石劈裂强度增长速度要低于石灰粉煤灰稳定碎石,可见在路面粉煤灰稳定碎石基层中用水泥代替石灰对路面劈裂强度的提高是十分有利的。

可以明显看出,黔北电厂粉煤灰的几种水泥(石灰)粉煤灰稳定碎石混合料中,使水泥(石灰)粉煤灰稳定碎石混合料抗压强度最大的碎石比例范围是75%~85%,使其劈裂强度最大的粒料比例是80%左右。综合碎石比例对抗压强度和劈裂强度的影响,以及实际使用中碎石的比例经验,水泥(石灰)粉煤灰混合料的粒料最佳比例范围是75%~85%,最佳值是80%,水泥粉煤灰混合料的最佳配合比C:F=1:7~1:5,水泥粉煤灰混合料的最佳配合比L:F=1:5~1:3。

2.5 水泥(石灰)粉煤灰稳定碎石的抗压回弹模量

作为路面的主要承重层,基层应具备一定的刚度。本节通过对水泥(石灰)粉煤灰稳定碎石两种类型的半刚性材料在不同组合、不同龄期的条件下进行试验研究,得到了水泥(石灰)粉煤灰稳定碎石的抗压回弹模量随配合比、龄期变化而变化的规律及各相关参数之间的关系。

①抗压回弹模量试验试件的制备及测试方法

1) 试件的制备依据及测试方法

试件的制备和养生按《公路工程无机结合料稳定材料试验规程 JTJ057-94》规定的方法进行, 试件规格为: 直径×高=150mm×150mm。采用顶面法进行抗压回弹模量。

2) 试验步骤

a. 承载板上的计算压力的选定值: 0.5~0.7MPa;

b. 将已浸水一昼夜的试件从水中取出并用布擦干后放在加载底板上, 在试件顶面稀撒少量 0.25~0.5mm 的细砂, 并手压加载顶板在试件顶面边压边旋转, 使细砂填充表面微观的不平整, 并使多余的砂流出, 以增加顶板与试件的接触面积;

c. 安置千分表, 使千分表的脚支在加载顶板直径线的两侧并离试件中心距离大致相等;

d. 将带有试件的测形变装置放到路面材料强度试验仪的升降台上(也可以先将测形变装置放在升降台上再安置试件和千分表), 调整升降台的高度, 使加载顶板与测力环下端的压头中心与加载顶板的中心接触;

e. 预压: 先用拟施加的最大荷载的一半进行两次加荷卸荷预压试验, 使加载顶板与试件顶面紧密接触。第二次卸载后等待 1min, 然后将千分表的短指针约调到中间位置, 长指针调到 0。记录千分表的原始读数;

f. 回弹形变测量: 将预定的单位压力分成 5~6 个等分, 作为每次施加的压力值。实际施加的荷载应较预定级数增加一级。施加第一级荷载(如为预定最大荷载的 1/5), 待荷载作用达 1min 时, 记录千分表的读数。同时卸去荷载, 让试件的弹性形变恢复, 到 0.5min 时记录千分表的读数。施加第二级荷载(为预定最大荷载的 2/5), 同前, 待荷载作用 1min 并记录千分表的读数, 卸去荷载。卸荷后达 0.5min 时, 记录千分表的读数, 并施加第三级荷载。如此逐级进行, 直至记录下最后一级荷载下的回弹形变。

3) 抗压回弹模量的计算方法

a. 计算每级荷载下的回弹形变 l

$l = \text{加荷时平均读数} - \text{卸荷后平均读数}$

b. 以单位压力 p 为横坐标(向右), 回弹形变 l 为纵坐标(向下), 绘制 p 与 l 的关系曲线。修正曲线开始段的虚假形变。

c. 用加载板上的计算单位压力 p 以及与其相应的回弹形变 l 按下式计算回弹模量 E

$$E = \frac{PH}{L} \quad (\text{MPa}) \quad (2.8)$$

式中：P—单位压力 (N)；

H—试件高度 (mm)；

L—试件回弹变形 (mm)。L=加荷时的读数—卸荷时的读数。

② 抗压回弹模量试验结果如下表所示：

表 2.23 抗压回弹模量试验结果(单位：MPa)

Table 2.23 Test results of resilience compressive modulus(MPa)

类 型 龄 期	水泥粉煤灰稳定碎石			石灰粉煤灰稳定碎石		
	C2	C3	C5	L2	L3	L4
7 天	1054	927	1302	275	345	311
28 天	1319	1347	1579	564	698	669
90 天	1476	1539	1673	931	1157	1063
28/7	1.25	1.45	1.21	2.05	2.04	2.15
90/28	1.12	1.14	1.06	1.65	2.01	1.59

③抗压回弹模量实验结果分析：

a. 水泥粉煤灰稳定碎石和石灰粉煤灰稳定碎石的抗压回弹模量均随着龄期的增加有所增长，相对于石灰粉煤灰稳定碎石，水泥粉煤灰稳定碎石回弹模量的增长速度较低；

b. 对比 7 天、28 天、90 天龄期的回弹模量可知：28 天龄期之后，水泥粉煤灰稳定碎石的抗压回弹模量增长速度趋于平缓，而石灰粉煤灰稳定碎石的回弹模量保持较快增长速度；

c. 对比 C2 与 C5 可知，随着混合料中水泥含量的增加，混合料各龄期回弹模量均有所增加，可见水泥含量对混合料抗压回弹模量增长的影响是显著的，减少水泥用量，则混合料刚度减小、脆性降低、柔性增加。

d. 对比 C5 与 L2，前者配合比为水泥：粉煤灰：碎石=4：21：75，后者配合比为石灰：粉煤灰：碎石=4：21：74，回弹模量对比可知：无论是 7 天、28 天还是 90 天抗压回弹模量，C5 均比 L2 要大得多，可见水泥替代石灰对于回弹模量的增长具有较大的促进作用。

2.6 影响水泥（石灰）粉煤灰稳定碎石混合料强度的因素分析

通过分析水泥（石灰）粉煤灰稳定碎石混合料的强度形成机理及试验结果，研究水泥（石灰）粉煤灰稳定碎石混合料强度的影响因素。

(1) 集料质量

1) 有机质的含量

碎石中含有有机质对水泥的胶结是很有害的。含有少量有机质的水泥粉煤灰稳定碎石, 早期强度很低且强度增长缓慢。而不含有机质的水泥稳定碎石早期强度高且强度增长较快。现行规范规定, 在用水泥粉煤灰稳定碎石做底基层时, 有机质的含量不得超过 2%; 做基层时, 有机质的含量不得超过 0.5%。

2) 硫酸盐含量

硫酸盐能与硬水泥中铝酸三钙结合而产生硫酸铝酸钙。这一新生物宜膨胀, 引起体积增大, 从而破坏水泥粉煤灰稳定碎石的胶结, 影响水泥粉煤灰稳定碎石的强度。现行规范中规定硫酸盐的含量不得超过 0.25%。

3) 粒径

集料中最大颗粒的粒径不应超过规定的路面基层材料最大粒径 (37.5mm), 用于高速公路和一级公路时集料压碎值应 $\leq 30\%$, 用于二级和二级以下公路时应 $\leq 35\%$ 。

(2) 集料级配组成

集料的性能除了应该达到规范规定的技术标准外, 还应具有良好的级配, 排列紧密, 具有较小的空隙率, 以保证在结合料的胶结作用下抗变形能力强, 稳定性好且具有较高的强度。实践证明, 用同一剂量的水泥粉煤灰稳定级配良好的集料, 其强度和耐久性比稳定级配不好的集料的强度和耐久性要高得多, 且骨架密实结构的水泥粉煤灰稳定碎石混合料的强度优于悬浮密实结构。

长安大学刘红瑛在硕士论文《骨架密实型二灰稳定碎石基层配合比设计方法及路用性能研究》^[27]中的研究表明, 空隙率较小的骨架密实型二灰稳定碎石 7d 无侧限抗压强度较其他结构高一些。

(3) 水泥质量及剂量

级配集料不具有任何粘结力, 粉煤灰也须与水泥一起才能发挥其促使强度增长的作用, 集料中掺入足够量的水泥, 在其胶结作用下, 才能形成强度。普通硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥和火山灰质硅酸盐水泥都可用于水泥粉煤灰稳定碎石。通常情况下, 硅酸盐类水泥的稳定效果较好, 铝酸盐水泥虽可用于稳定但效果较差。

重庆交通大学杨锡武教授的《水泥(石灰)粉煤灰混合料路面基层研究》^[25]一文中, 配合比为水泥:粉煤灰:碎石=3:12:85 的水泥粉煤灰稳定碎石混合料的 7d 无侧限抗压强度试验结果为 3.0MPa, 所用水泥为永川水泥厂生产的 425# (即 32.5 级) 水泥。其强度低于本文中采用 32.5 级拉法基水泥时相同配合比的水泥粉煤灰稳定碎石混合料 C4 (3:12:85) 的强度 3.5MPa。可见水泥品种对水泥粉煤灰稳定碎石混合料的无侧限抗压强度具有显著影响。

由无侧限抗压强度试验结果可知, C5 几种水泥粉煤灰稳定碎石混合料中, 当水泥含量由 C1、C2、C3、C4 的 3% 增长到 C5 的 4% 时, 无侧限抗压强度有大幅度增长, 可见水泥粉煤灰稳定碎石的强度随水泥剂量的增加而增长。但过多的水泥用量, 虽获得强度的增加, 经济上却不一定合理, 且容易开裂。

我国现行规范通过配置同一种集料, 不同水泥剂量的混合料来确定各种混合料的最佳含水量和最大干密度, 按最佳含水量和计算所得的干密度制备试件, 对试件进行无侧限抗压强度试验, 确定满足抗压强度的水泥剂量。

(4) 石灰质量与剂量

石灰应为消石灰粉或生石灰粉, 对于告诉公路和一级公路, 宜采用磨细生石灰粉。石灰质量应符合“石灰技术标准”中 III 级以上的技术标准。在同等石灰剂量下, 质量好的石灰, 稳定效果好。使用等外石灰、贝壳石灰、珊瑚石灰等, 应通过试验。只要石灰粉煤灰稳定碎石混合料的 7d 浸水抗压强度符合“石灰粉煤灰稳定土混合料的强度标准”的石灰, 均可使用。

重庆交通大学杨锡武教授的《水泥(石灰)粉煤灰混合料路面基层研究》一文中, 配合比为石灰:粉煤灰:碎石=4:11:85 的石灰粉煤灰稳定碎石混合料的 7d 无侧限抗压强度为 0.77MPa, 7d 劈裂强度为 0.05MPa。本文相同配合比的石灰粉煤灰稳定碎石混合料 L4(4:11:85) 的强度试验结果显示 7d 无侧限抗压强度为 0.83MPa, 7d 劈裂强度为 0.04MPa。本文所用石灰的 CaO 含量为 83.96%, MgO 含量为 3.96%; 杨锡武教授所用石灰 CaO 含量为 59.4%, MgO 含量为 0.92%。可见石灰质量对于石灰粉煤灰稳定碎石混合料的强度是有影响的。

石灰剂量对石灰粉煤灰稳定碎石的强度影响显著。石灰剂量较低 (<3%~4%) 时, 石灰主要起稳定作用, 集料的塑性、膨胀、吸水量减小, 使集料的密实度、强度得到改善。河北工业大学吕兰明在硕士论文《沥青路面半刚性基层材料的路用性能研究》^[26] 中的研究表明, 石灰粉煤灰稳定碎石混合料的强度随着石灰含量的增加而增加。但当剂量超过一定范围时, 强度反而降低, 因而存在最佳石灰剂量。石灰剂量应根据结构层技术要求进行混合料组成设计确定。

(5) 粉煤灰质量与剂量

粉煤灰的化学组成及物理特征对其火山灰反应的强度以及对水泥稳定碎石性能的改善均有重要作用。为保证粉煤灰的水泥稳定碎石的路用性能, 规范规定粉煤灰中 SiO₂、Al₂O₃ 和 Fe₂O₃ 的总含量应大于 70%, 粉煤灰的烧失量不应超过 20%, 粉煤灰的比表面积宜大于 2500 cm²/g, 湿排粉煤灰的含水量不宜超过 35%。

武汉理工大学陈潇的硕士论文《水泥粉煤灰稳定碎石路面基层材料的设计与研究》^[26] 表明, 粉煤灰的品质主要由其细度、活性以及活性物质的含量所决定, 同时也受到粉煤灰表面状态的影响; 粉煤灰的品质通过影响水泥粉煤灰结合料的

强度,进而影响水泥粉煤灰稳定碎石材料的强度性能,可见粉煤灰的品质对于材料的性能影响很大。

由本文力学性能试验结果可知,水泥粉煤灰稳定碎石混合料 C1、C2、C3、C4 的水泥含量均为 3%,粉煤灰含量分别为 70%、75%、80%、85%,其无侧限抗压强度和劈裂强度都有较大差别,可见粉煤灰含量对水泥粉煤灰稳定碎石混合料的强度影响是明显的。粉煤灰的掺量应跟水泥掺量一致,通过无侧限抗压强度试验确定水泥和粉煤灰的比例及各自用量。

长安大学杨文丁的硕士学位论文《半刚性基层材料收缩性能研究》^[29]中,配合比为 4:11:85 的石灰粉煤灰稳定碎石混合料的 7d 无侧限抗压强度为 0.86MPa,劈裂强度为 0.42MPa;本文中配合比相同的混合料 7d 无侧限抗压强度为 0.83MPa,劈裂强度为 0.04MPa;重庆交通大学杨锡武教授的《水泥(石灰)粉煤灰混合料路面基层研究》一文中,配合比为石灰:粉煤灰:碎石=4:11:85 的石灰粉煤灰稳定碎石混合料的 7d 无侧限抗压强度为 0.77MPa,7d 劈裂强度为 0.05MPa。三种相同配合比混合料采用了不同的粉煤灰, SiO₂、Al₂O₃ 和 Fe₂O₃ 的总含量分别为 78.86%、75.52%、80.61%。本文试验数据与杨锡武教授试验数据接近,而与杨文丁试验结果在抗压强度较为接近,而劈裂强度相差较大。可见粉煤灰质量对抗压强度和劈裂强度均有影响,其中对劈裂强度的影响高于对抗压强度的影响。

由本文的强度试验结果可知, L1、L2、L3、L4 四种石灰粉煤灰稳定碎石混合料中粉煤灰的含量分别为 26%、21%、16%、11%,而四种混合料的无侧限抗压强度和劈裂强度均随着粉煤灰含量的增加表现为先增大后减小,抗压强度在 L3 处达到最大,劈裂强度在 L2 处就已达最大。可见粉煤灰含量对石灰粉煤灰稳定碎石混合料的强度有着显著影响。当粉煤灰含量过多时,会破坏混合料的骨架结构,减弱骨料的嵌挤作用,从而导致强度下降。粉煤灰和石灰之间存在着最优比例,需通过实验确定。

(6) 含水量

水是水泥(石灰)粉煤灰稳定碎石的总要组成部分,它促使水泥(石灰)粉煤灰稳定碎石发生物理化学变化,形成强度;便于集料的拌和及压实,并且有利于养生。不同配合比的水泥(石灰)粉煤灰稳定碎石有着不同的最佳含水量,需要通过标准击实试验确定,并用以控制施工中的实际加水量。

2.7 本章小结

(1) 黔北电厂粉煤灰具有较好的物理化学性质, 完全符合《公路路面基层施工技术规范 JTJ034-2000》对基层用粉煤灰的技术性能要求, 可用作半刚性基层材料。

(2) 黔北电厂粉煤灰的水泥粉煤灰稳定碎石混合料的 7d 无侧限抗压强度范围为 3.5~4.8MPa, 略高于《公路沥青路面设计规范 JTG D50-2006》中特重、重、中交通对水泥粉煤灰稳定碎石强度的要求, 可见黔北电厂粉煤灰的水泥粉煤灰稳定碎石基层强度可满足各类交通需要, 可用于修建各等级公路基层。

(3) 黔北电厂粉煤灰的石灰粉煤灰稳定碎石混合料的 7d 无侧限抗压强度范围为 0.5~1.0MPa。其中 L1 (4:26:70) 的强度为 0.5MPa, 仅符合《公路沥青路面设计规范 JTG D50-2006》中轻交通石灰粉煤灰稳定类材料底基层的抗压强度要求, 适用范围很小; L2 (4:21:75) 的无侧限抗压强度为 0.7MPa, 符合规范中特重、重、中交通底基层和轻交通基层、底基层强度要求; L3 (4:16:80) 和 L4 (4:11:85) 的无侧限抗压强度均高于 0.8MPa, 符合各类交通的石灰粉煤灰稳定类材料基层和底基层强度要求。可见黔北电厂粉煤灰的石灰粉煤灰稳定碎石适用范围相对狭窄, 在进行基层配合比设计时, 应检验设计混合料的无侧限抗压强度以适用于对应交通量。

(4) 用水泥替代石灰后, 水泥粉煤灰稳定碎石混合料的早期无侧限抗压强度比石灰粉煤灰稳定碎石混合料要高的多, 这对于及早进行面层的摊铺是有利的。

(5) 同一配合比, 用水泥替代石灰后, 水泥粉煤灰稳定碎石混合料的早期劈裂强度比石灰粉煤灰稳定碎石混合料要高的多, 但用水泥替代石灰后混合料抗压回弹模量增高, 刚度较大, 脆性较高。

(6) 黔北电厂粉煤灰的水泥(石灰)粉煤灰稳定碎石混合料, 使水泥(石灰)粉煤灰稳定碎石混合料抗压强度最大的碎石比例范围是 75%~85%, 使其劈裂强度最大的粒料比例是 80%左右。综合碎石比例对抗压强度和劈裂强度的影响, 以及实际使用中碎石的比例经验, 水泥(石灰)粉煤灰混合料的粒料最佳比例范围是 75%~85%, 最佳值是 80%, 水泥粉煤灰混合料的最佳配合比 C: F=1: 7~1: 5, 水泥粉煤灰混合料的最佳配合比 L: F=1: 5~1: 3。这样既能既保证混合料有足够抗压强度, 又使混合料具有良好的抗拉强度, 减少破坏。

第三章 黔北电厂粉煤灰稳定碎石混合料的水稳定性及抗冻性研究

3.1 黔北电厂粉煤灰稳定碎石混合料的水稳定性

沥青路面，特别是一些开级配的沥青路面，渗水较严重，且沥青路面大多在高温季节摊铺，使用初期透水性较大。在夏季多雨季节，雨水可能通过沥青路面渗透到基层和底基层中，或从沥青路面与路缘石的结合处渗透到基层中去。同时，沥青路面在使用过程中，由于行车碾压和低温收缩，沥青路面不可避免的产生开裂，一旦路面发生开裂，雨水也会从裂缝中进入基层。水泥混凝土路面的接缝和裂缝也会成为水分进入基层的便捷渠道。在地下水位接近地表的地段，特别是路基填土不高时，地下水可通过毛细作用进入路面结构层。在冰冻地区，由于冬季水分重分布，路基上层和路面底基层都可能处于潮湿或过分潮湿状态。沥青面层虽不完全透水，但能阻碍路面结构层和土基中的水分蒸发。研究表明，水分从沥青面层中蒸发出来要比透进去困难得多。进入基层的水分能使基层强度降低，承载能力下降，同时在行车荷载重复作用下可造成沥青路面的坑槽、开裂以及水泥混凝土路面的唧浆等多种破坏形式，冰冻地区情况更糟。综合考虑以上原因，基层在含水量增大的情况下强度变化不应太大，应具有一定的水稳定性。在确定基层材料的强度时，必须考虑表面水不可避免地要进入基层的最不利情况，检验其水稳定性。

3.1.1 水稳定性试验方法

试件的制备与无侧限抗压强度、劈裂强度、抗压回弹模量所用试件制备方法一样，遵照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程（JTJ057-94）》规定的方法进行。试件尺寸为：直径×高=15cm×15cm，密实度为98%。通常用软化系数来表征混合料的水稳定性，软化系数的计算方法为标准养护龄期最后一天泡水与不泡水试件的无侧限抗压强度对比。

$$\text{软化系数} = \frac{\text{试件在饱水状态的极限抗压强度}}{\text{试件未饱水状态的极限抗压强度}} \quad (3.1)$$

由于试件养生最后一天进行泡水，水分很难完全填充试件内部空隙。而半刚性基层在水分的长期浸泡作用下很可能被完全浸透，短暂的泡水无法模拟半刚性基层的实际受水影响状态，此处采用水稳系数来反映水泥（石灰）粉煤灰稳定碎石混合料的水稳定性。

用于计算水稳系数的水养试件经恒温恒湿养生48小时后置于水中养护，养护温度为 $25 \pm 2^\circ\text{C}$ ，龄期分别为7天、28天和90天。水稳系数按下式计算：

$$\text{水稳系数} = \frac{\text{水养生时的无侧限抗压强度}}{\text{常规养生时的无侧限抗压强度}} \quad (3.2)$$

常规养生时, 试件以最佳含水量和最大干密度成型后立即用塑料薄膜包裹, 并放入恒温恒湿的养护室中进行养护, 在养护期间保持试件最佳含水量不变, 强度随龄期而增长。在养生期的最后一天将包裹试件的薄膜去掉, 并将试件浸泡在水中, 水面高度在试件顶上约 2.5cm。浸泡一昼夜后将试件取出, 擦干表面自由水后, 使用路基路面强度测试仪进行无侧限抗压强度试验。试件在常规养生期除最后一天浸水外, 均在最佳含水量和最大干密度的理想情况下保持强度的不断增长, 是一种理想状态。在恒温恒湿养生期间, 混合料的强度以 $25 \pm 2^\circ\text{C}$ 条件下最快速度增长, 在养生期末达到理想状态下的最大值。

水养生时, 试件以最佳含水量和最大干密度成型后立即用塑料薄膜包裹, 并放入恒温恒湿的养护室中进行养护 2 天。2 天后除去薄膜, 并将试件浸泡在水中, 水面高度在试件顶上约 2.5cm, 此时试件进入水养生期, 直至养生期结束。养生结束后取出试件, 擦干表面自由水后, 使用路基路面强度测试仪进行无侧限抗压强度试验。水养生之前两天的恒温恒湿养生, 使混合料在最佳强度增长环境下具备了一定的初期强度。之后进入浸水养生期, 此时混合料的含水量逐渐上升达到饱水, 在饱水条件下混合料强度不断随龄期增长。

通过区别于恒温恒湿养生的水养生后的无侧限抗压强度与常规养生的无侧限抗压强度对比, 考察水养生时无侧限抗压强度相对于理想状态的损失值或增加值, 检验半刚性基层的水稳定性。

3.1.2 水稳定性试验数据

水泥粉煤灰稳定碎石和石灰粉煤灰稳定碎石的水稳定性试验结果如表 3.1 所示:

表 3.1 水稳定性试验数据

Table 3.1 Test results of water stability

龄期及养生方法	水泥粉煤灰稳定碎石			石灰粉煤灰稳定碎石		
	C2	C3	C5	L2	L3	L4
7 天水养强度 (MPa)	3.9187	4.3497	4.9681	0.5223	0.7250	0.7675
7 天常规强度 (MPa)	4.4952	3.6147	4.7641	0.7155	0.9666	0.8252
水稳系数 (%)	87	120	104	73	75	93
28 天水养强度 (MPa)	4.6313	5.2725	5.7190	1.2461	1.8988	1.7103
28 天常规强度 (MPa)	5.0984	5.5678	7.7710	1.7550	2.1671	2.1044
水稳系数 (%)	91	95	74	71	88	81
90 天水养强度 (MPa)	6.9652	6.7743	7.1473	2.4342	3.9993	3.6393
90 天常规强度 (MPa)	7.9800	7.4955	8.5500	3.2456	4.7051	4.3980
水稳系数 (%)	87	90	84	75	85	83

3.1.3 水稳定性试验数据分析

由上表所示黔北电厂粉煤灰稳定碎石的水稳系数可知:

①黔北电厂粉煤灰的水泥粉煤灰稳定碎石和石灰粉煤灰稳定碎石,各龄期的无侧限抗压强度经水中养生后,大部分强度有所下降。7天龄期水养后 C3、C5 两种水泥粉煤灰稳定碎石的无侧限抗压强度稍有增长。

②黔北电厂粉煤灰的水泥粉煤灰稳定碎石和石灰粉煤灰稳定碎石的水稳系数均大于 70%,大部分在 80%以上,具有较好的水稳定性。水泥粉煤灰稳定碎石的水稳系数一般比石灰粉煤灰稳定碎石的水稳系数要高。

③在水中养生后,对比黔北电厂粉煤灰的水泥粉煤灰稳定碎石和石灰粉煤灰稳定碎石的强度可知,前者各龄期强度均比后者大得多,这与常规养生时的无侧限抗压强度一致。

④水中养生的水泥(石灰)粉煤灰稳定碎石的无侧限抗压强度增长规律与常规养生强度增长规律基本保持一致。

⑤对比 C2 和 C3 可知,随着混合料中碎石含量的增长,其各龄期水稳系数均有所增加。

⑥对比 L2、L3、L4 可知,7 天龄期的水稳系数 L4 最大,之后 28 天和 90 天

龄期的水稳系数均是 L3 最大, 这与 L3 的 28 天和 90 天常规养生时无侧限抗压强度最高一致。

⑦对比 C2 和 C5 可知, 无论是常规养生还是水中养生, 随着混合料中水泥含量的增加, 各龄期水泥粉煤灰稳定碎石的无侧限抗压强度均有大幅度增加。

⑧对比 C5 和 L2 可知, C5 配合比为水泥: 粉煤灰: 碎石=4: 21: 75, L2 配合比为石灰: 粉煤灰: 碎石=4: 21: 75, 可见用等量的水泥和石灰等量的粉煤灰来稳定碎石, 黔北电厂粉煤灰的水泥粉煤灰稳定碎石的水稳性要优于石灰粉煤灰稳定碎石。

3.2 黔北电厂粉煤灰稳定碎石混合料的抗冻性

路表水及地下水会通过各种途径进入路面结构中, 在冻融循环反复作用下半刚性基层材料强度逐渐下降, 产生薄弱面, 甚至在薄弱面发生开裂破坏。因此选择抗冻性能良好的材料作基层在一定程度上可以缓解基层开裂破坏的发生。就其基层破坏机理解释如下:

1. 液体膨胀压力。基层材料为多空隙材料, 这类材料受冻融循环作用时, 其内部空隙水冻胀产生的附加内应力将重复对材料的空隙壁产生挤压破坏作用。根据有关资料分析, 孔隙中含水量超过某一临界值时, 由于水结冰时体积膨胀 996, 将产生很大压力。此压力的大小除了决定于孔隙的含水量之外, 还与水流动距离、水的冻结速度及孔隙的形状有关。其中空隙的形状影响到尚未结冰的水向周围孔隙流动的阻力。

2、渗透压力。由于毛细管中的水不是纯水, 而是含有几种可溶盐(大多数情况下是碱)。盐浓度增加时, 冻结温度降低, 这在基层材料中是不会改变的, 因此盐的浓度形成一个梯度。当基层材料微孔中, 溶液部分结冰时引起渗透压力。水结冰时, 液体压力很高, 产生很大渗透压, 可能是基层破坏的另一个原因。基于以上原理, 冻融循环试验除了用于评定材料的抗冻性之外, 也常用于评价有孔隙材料的耐久性。

在冰冻地区, 在地下水位接近地表或路基两侧有长期积水的情况下, 如果路基填土高度不大, 在冬季土路基中会发生水分重分布。在 $0\sim-3^{\circ}\text{C}$ 温度下, 水分较长期滞留的深度范围内会形成严重的聚冰现象, 土层中会有很多冰晶体, 甚至冰夹层。这层土常称作路基中的聚冰带。至春融期间该聚冰带化冻时, 土层变得过分潮湿, 使土基的强度急剧下降。如果在这种可能变得过分潮湿的土基上铺筑直接与土基相接触的路面结构层的材料具有明显的毛细水作用, 例如含细土较多的石灰土、水泥土等, 则在这种材料层内也会发生水分重分布现象。如果这些材料层又位于冰冻深度范围内, 则在这些材料层内也可能发生聚冰带。另外冬季由

于降雪不能及时清除,一些雪水也会通过路面进入到基层中,冬季天气寒冷,这些自由水在基层中形成冰冻体。到春融化冻期间,这些材料的强度也会明显下降,导致路面整体承载能力明显下降,甚至破坏。

因此,在冰冻地区的潮湿路段上,在路面的底基层或基层内有可能产生聚冰带时,应该采用冰冻稳定性好的材料。考察半刚性基层材料稳定性时,需要检验其冻融循环稳定性。

3.2.1 抗冻性试验方法

试件的制备与无侧限抗压强度、劈裂强度、抗压回弹模量所用试件制备方法一样,遵照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程(JTJ057-94)》规定的方法进行。试件尺寸为:直径×高=15cm×15cm,密实度为98%。本试验所采用的方法是将养生至28天龄期的试件养生期最后一天将试件饱水24h后,在-20℃冰箱内冻18h,取出放在20℃水中融化6h,此为一循环,经5次冻融循环后的饱水抗压强度与未经冻融循环的试件饱水抗压强度的比值,即:

$$\text{抗冻系数} = \frac{\text{试件经冻融循环后的饱水抗压强度}}{\text{试件未经冻融循环的饱水抗压强度}} \quad (3.3)$$

以抗冻系数来评价半刚性材料的抗冻性。抗冻系数越大表明半刚性材料的抗冻性能越好;反之,则越差。

《公路沥青路面设计规范 JTG D50-2006》规定,中冰冻、重冰冻区的高速公路、一级公路采用石灰粉煤灰稳定类材料做基层时,应进行抗冻性能检验。抗冻性能采用28d龄期的试件经18℃~-18℃的5次冻融循环后的残留抗压强度与28d龄期的抗压强度(MPa)之比进行评价,其指标如表3.2:

表 3.2 石灰粉煤灰稳定类材料抗冻性能技术要求

Table 3.2 frozen stability requirements of lime and fly-ash stabilized material

气候分区	重冻区	中冻区
残留抗压强度比 (%)	≥70	≥65

3.2.2 抗冻性试验数据

水泥粉煤灰稳定碎石和石灰粉煤灰稳定碎石的抗冻性试验结果如表3.3所示:

表 3.3 抗冻性能试验数据

Table 3.3 Test results of frozen stability

龄期及养生方法	水泥粉煤灰稳定碎石			石灰粉煤灰稳定碎石		
	C2	C3	C5	L2	L3	L4
冻融循环强度 (MPa)	4.2214	4.8155	7.1725	1.2439	1.65375	1.5541
28天常规强度 (MPa)	5.0984	5.5678	7.771	1.755	2.1671	2.1044
抗冻系数 (%)	83	86	92	71	76	74

3.2.3 抗冻性试验数据分析

①经冻融循环, 黔北电厂粉煤灰的水泥粉煤灰稳定碎石和石灰粉煤灰稳定碎石的无侧限抗压强度都有所下降, 且水泥粉煤灰稳定碎石的抗冻系数要高于石灰粉煤灰稳定碎石。

②黔北电厂粉煤灰的水泥粉煤灰稳定碎石的抗冻系数在 83%~92%, 石灰粉煤灰稳定碎石的抗冻系数在 71%~76%, 满足规范中重冻区抗冻系数为 70%的要求, 两者均可用于重冻区和中冻区的半刚性基层。而且黔北电厂粉煤灰的水泥粉煤灰稳定碎石的抗冻性能要优于石灰粉煤灰稳定碎石。

③对比 L2、L3、L4 的抗冻系数, $L3 > L4 > L2$, 这与冻融前后无侧限抗压强度 $L3 > L4 > L2$ 是一致的黔北电厂粉煤灰的水泥粉煤灰稳定碎石和石灰粉煤灰稳定碎石经冻融循环后无侧限抗压强度变化规律与常规养生时无侧限抗压强度变化规律一致。

④对比 C2 和 C3, 可知水泥粉煤灰稳定碎石的抗冻系数随着碎石含量的增大而增大。

⑤对比 C2 和 C5, 水泥粉煤灰稳定碎石的抗冻系数随着水泥含量的增多而增大。

⑥对比 C5 和 L2, C5 配合比为水泥: 粉煤灰: 碎石=4: 21: 75, L2 配合比为石灰: 粉煤灰: 碎石=4: 21: 75。等量的水泥替代石灰与粉煤灰来稳定碎石, 水泥粉煤灰稳定碎石的抗冻系数较高, 说明其冰冻稳定性要优于石灰粉煤灰稳定碎石。

3.3 本章小结

本章研究黔北电厂粉煤灰的水泥粉煤灰稳定碎石和石灰粉煤灰稳定碎石的水稳定性和抗冻性能。

(1) 选择了水稳定性和抗冻性能的试验方法, 并对试验数据进行分析。试验数据表明: 黔北电厂粉煤灰的水泥粉煤灰稳定碎石和石灰粉煤灰稳定碎石 7d、28d、

90d 龄期的无侧限抗压强度, 经水中养生或冻融循环后均有所降低, 降低后混合料的无侧限抗压强度大小规律与常规养生时一致, 不同配合比混合料的水稳系数和抗冻系数均在常规养生时无侧限抗压强度最高时达到最高。

(2) 黔北电厂粉煤灰的水泥粉煤灰稳定碎石和石灰粉煤灰稳定碎石混合料具有较好的水稳定性, 其水稳系数均大于 70%, 大部分在 80% 以上, 且具有相同碎石含量的 C2 与 L2 相比、C3 与 L3 相比前者的水稳系数均高于后者, 可见相同碎石含量的水泥粉煤灰稳定碎石的水稳系数要高于石灰粉煤灰稳定碎石。经冻融循环后, 黔北电厂粉煤灰的水泥粉煤灰稳定碎石和石灰粉煤灰稳定碎石的无侧限抗压强度都有所降低, C2、C3 两种水泥粉煤灰稳定碎石的抗冻系数分别为 83%、86%; L2、L3 两种石灰粉煤灰稳定碎石的抗冻系数分别为 71%、76%; L2、L3 两种石灰粉煤灰稳定碎石的碎石含量分别与 C2、C3 相同, 但 L2、L3 的抗冻系数远低于 C2、C3, 可见相同碎石含量的水泥粉煤灰稳定碎石的抗冻系数要高于石灰粉煤灰稳定碎石。对比 C5 和 L2, 二者具有相同的结合料含量, 水泥粉煤灰稳定碎石的水稳系数和抗冻系数均高于石灰粉煤灰稳定碎石。

(3) 黔北电厂粉煤灰的水泥粉煤灰稳定碎石和石灰粉煤灰稳定碎石均具有较好的水稳定性和抗冻性能, 水泥粉煤灰稳定碎石的水稳定性和抗冻性能优于石灰粉煤灰稳定碎石。我国自然气候条件区域差异显著, 各地区水温状况相差较大, 黔北电厂粉煤灰的水泥粉煤灰稳定碎石和石灰粉煤灰稳定碎石半刚性基层具有较好的水稳定性和抗冻性能, 应用范围广阔。

第四章 黔北电厂粉煤灰稳定碎石混合料的收缩性能研究

作为当前高等级公路主要基层形式的无机结合料稳定类半刚性基层具有大量优点:稳定性好,抗冻性强,结构本身自成整体;刚度和强度随着龄期不断增加,可满足交通量及轴载增加对道路承载能力的需要;对原材料质量要求较低,其他基层类型无法利用的质量较次材料也可用于铺筑半刚性基层,能够充分利用工程当地的砂石材料,选材十分方便;另外,基层强度随无机结合料的类型和剂量变化也有较大变化,因而具有很强的适应性。^[30]尽管具有如此多的优点,半刚性基层在多年的应用当中仍然发现了大量的问题存在,如半刚性基层沥青路面的裂缝严重、结构排水条件差、对重载车具有更大的轴载敏感性等一系列问题,严重影响道路的行驶质量及使用寿命。^[31]其中收缩裂缝问题作为最典型的半刚性基层自身缺陷,不仅使车辆行驶质量下降,而且也破坏了路面结构整体性和连续性,并在一定程度上导致结构强度的削弱,加速路面的破坏。^[32]半刚性基层材料的收缩性和抗裂性的好坏,直接影响面层裂缝的轻重程度。这些早已引起了各方面的高度重视,大量学者进行了长期的研究工作,对路面裂缝形成机理有了深入的认识,也提出了多种减少裂缝的方法,主要有选择骨架密实结构的半刚性基层材料,严格控制无机结合料剂量以减少收缩裂缝,在基层与面层间设置应力吸收层或级配碎石过渡层等,但这些都不能从根本上消除半刚性基层的收缩开裂。本章分析水泥粉煤灰稳定碎石和石灰粉煤灰稳定碎石两种半刚性基层材料的干燥收缩和温度收缩特性,研究无机结合料类型、无机结合料剂量、水泥(石灰)与粉煤灰比例等对半刚性基层收缩的影响。

4.1 收缩特性试验方法

4.1.1 干缩试验方法

①干缩特性

无机结合料稳定材料经拌合压实后,由于水分蒸发和混合料内部的水化作用,混合料的水分不断减少。由此发生的毛细管作用、吸附作用、分子间力的作用、材料矿物晶体或凝胶体间层间水的作用和碳化收缩作用等会引起无机结合料稳定类材料的体积收缩。描述材料干缩特性的指标主要有干缩应变、干缩系数、干缩量、失水量、失水率和平均干缩系数^[33]。

干缩应变(ε_d)是水分损失引起的试件单位长度的收缩量($\times 10^{-6}$);

干缩系数(α)是某失水量时,试件单位失水率的干缩应变($\times 10^{-6}$);

干缩量(Δl)是水分损失时试件的收缩量, 10^{-6} mm;

失水量是试件失去水分的质量(g);

失水率($\Delta\omega$)是试件单位质量的失去量(g);

平均干缩系数(α_d)是某失水量时,试件的干缩应变与试件的失水率之比($\times 10^{-6}$);

$$\varepsilon_d = \Delta l / l \quad (4.1)$$

$$\alpha_d = \varepsilon_d / \Delta \omega \quad (4.2)$$

式中: Δl ——含水量损失 $\Delta \omega$ 时,试件的整体收缩量(mm);

l ——试件长度(mm);

$\Delta \omega$ ——失水率,即试件损失水分重量与试件所用材料干重之比(%)。

②干缩试验方法

干缩试验采用机械法,主要设备包括基座、测定变形量的千分表以及千分表支架。根据重型击实试验所得最佳含水量和最大干密度制备试件,成型后立即将试件用塑料薄膜包裹并在 $25 \pm 2^\circ\text{C}$ 环境下养生七天。测试时,将梁式试件放置在基座上,并将试件一端固定,另一端安置千分表。当试件在环境条件下失水后,试件整体收缩或伸长会引起千分表触头移动并使得千分表产生读数,通过千分表数值的变化测得试件的变形值。

具体步骤如下:将达到养生龄期的试件小心的安放在预备好的玻璃基座上,试件下方垫放滚轴后固定一端。把千分表支架固定在玻璃基座上后,安放千分表,使千分表探头轻触试件与固定端相对的自由端表面,在室温下让水分自由散失,同时对放置条件相同的平行试件进行称量,进行收缩试验时室温为 $16^\circ\text{C} \sim 22^\circ\text{C}$ 。每隔 24h 记录千分表读数,称量平行试件的质量。千分表可精确记录干燥收缩量,精度为 0.001mm,因而其敏感性较强,干缩测试过程中千分表的显示值受周围环境影响较大,轻微震动即可引起千分表读数发生很大变化,因此每次记录千分表读数时应避免碰触千分表及台座等避免引起震动。试验认为用于测量收缩量及测量失水量的平行试件的初始含水量和含水量的散发速率完全相同。持续记录试件失水量至两次千分表读数不变,至此试验结束。试验结束后把试件放在 $105 \sim 110^\circ\text{C}$ 的烘箱中烘干,称量干燥试件的质量。计算干缩应变、干缩系数、干缩量、失水量、失水率和平均干缩系数等各项干燥收缩指标。

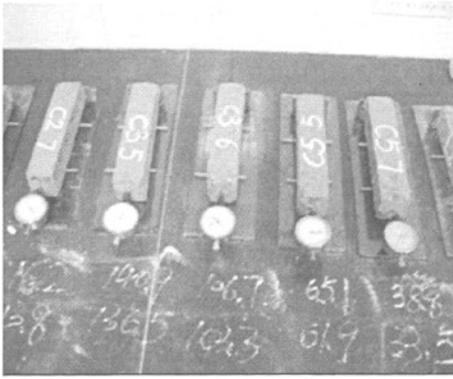


图 4.1 干缩应变测量中的试件

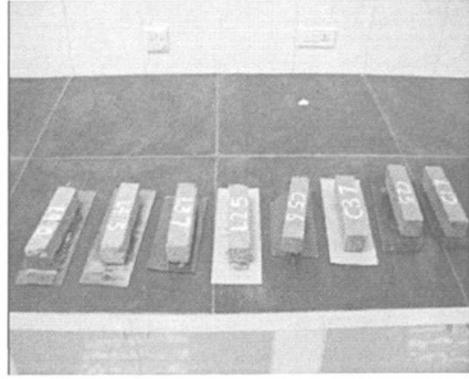


图 4.2 失水量测量中的试件

Fig.4.1 Specimens in shrinkage strain measure Fig.4.2 Specimens in loss of water measure

4.1.2 温缩试验方法

①温缩特性

组成半刚性材料的固相、液相（水）和气相在降温过程中相互作用使半刚性材料中具有不同物理性质的固体颗粒间互相嵌挤，产生体积收缩，即温度收缩。宏观外部的热胀缩性应该是固相颗粒之间的相互牵制、约束和相互作用的综合效应，而液、气相的热胀缩性对固相的综合效应有影响。所以，就组成固相的矿物颗粒而言，原材料中砂粒以上颗粒的温度收缩系数较小；粉粒以下颗粒，特别是粘土矿物的温度收缩性比较大。粘土及其他胶体颗粒的温度收缩性的大小与其扩散层厚度成正比。半刚性材料中胶结物有较大的温度收缩性。存在于半刚性材料内部的较大孔隙、毛细孔和凝胶孔中的水通过“扩张作用”、“表面张力作用”和“冰冻作用”三个作用过程，对半刚性材料的温度收缩性质产生极大的影响，使半刚性材料在干燥和饱水状态下有较小的温度收缩值。描述材料温缩特性的指标主要有温缩应变、温缩系数。^[33]

温缩应变（ ε ）是温度降低引起的试件单位长度的收缩量（ $\times 10^{-6}$ ）；

温缩系数（ β ）是在某一降温区间里，试件单位降温量的温缩应变（ $\times 10^{-6}$ ）；

平均温缩系数（ β_{ij} ）是某失水量时，试件的温缩应变与试件的温度下降量之比（ $\times 10^{-6}$ ）；

$$\beta_{ij} = \frac{\Delta \varepsilon_{ij}}{\Delta t_{ij}} + \beta_s \quad (4.3)$$

式中： β_{ij} —温度区间 i 至 j 的平均收缩系数；

$\Delta \varepsilon_{ij}$ —温度区间 i 至 j 的收缩应变， $\Delta \varepsilon_{ij} = \varepsilon_i - \varepsilon_j$ ；

Δt_{ij} —温度区间 i 至 j 的温度差， $\Delta t_{ij} = t_i - t_j$ ；

R —温度补偿标准性的温度收缩系数。

②温缩试验方法

半刚性基层材料的温缩试验常采用电测法，相对于机械法，电测法的试验精度得到了极大的提高，同时设备造价低廉，操作简单，非常适合相对于干缩试验来讲持续时间较短的温缩试验。试验采用华东电子仪器厂生产的 YJ-26 型静态电阻应变仪采集试件随温度变化时所贴电子应变片的应变值。

1) 试验原理

将电阻应变片粘贴在被测试件表面上，当试件受力变形时，金属电阻丝承受拉伸或压缩变形的同时电阻也将发生变化，在一定应变范围内，电阻丝的电阻改变率 $\Delta R/R$ 与应变 $\varepsilon = \Delta L/L$ 成正比，即： $\Delta R/R = k\Delta L/L$ ，电阻应变片将被测点的应变量转换为电阻变化率 $\Delta R/R$ 后，电阻应变仪测定应变片中电阻值的改变量并经放大处理，便可以换算出试件的应变值。

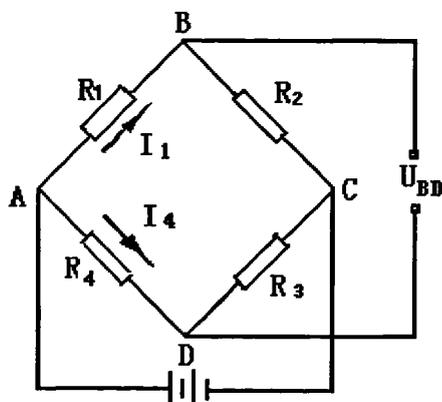


图 4.3 惠斯登电桥

Fig 4.3 Wheatstone bridge

电阻应变片由于试件变形而发生的电阻变化 ΔR 用惠斯登电桥来测量。在图 6.3 中以直流电桥为例来说明电桥的测量原理。图中四个桥臂 AB、BC、CD、DA 的电阻分别以 R_1, R_2, R_3, R_4 表示。在对角节点 A、C 上接电压为 E_1 的直流电源，另外一个对角节点 BD 为电桥输出端，输出的端电压用 U_{BD} 表示。

$$\text{即： } U_{BD} = U_{AB} - U_{AD} = I_1 R_1 - I_4 R_4$$

根据欧姆定律， I_1, I_4 可用 E 和 R_1, R_2, R_3, R_4 表示，

即： $I_1 = E_1 / (R_1 + R_2)$ ， $I_2 = E_1 / (R_3 + R_4)$ 所以可得下式：

$$U_{BD} = E_1 \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \quad (4.4)$$

电桥平衡时，B、D 端输出讯号电压为零，即 $U_{BD} = 0$ ，所以有： $R_1 R_3 = R_2 R_4$ 。

设电桥的四个桥臂的电阻的改变量分别为 $\Delta R_1, \Delta R_2, \Delta R_3, \Delta R_4$ ，于是电桥

输出端的电压为可用如下式(4.2)计算:

$$U_{BD} + \Delta U_{BD} = E_1 \frac{(R_1 + \Delta R_1)(R_3 + \Delta R_3) - (R_2 + \Delta R_2)(R_4 + \Delta R_4)}{(R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2)(R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4)} \quad (4.5)$$

在电测应力分析中,若电桥的四个桥臂 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 均为粘贴在构件的电阻应变片,当构件受力后,电阻应变片的电阻的变化 ΔR_i ($i=1, 2, 3, 4$) 与 R 相比通常情况下要小得多。(4.5)式中 ΔR_i 相对于 R_i 可以忽略不计。因此,将式(4.5)减去式(4.4)得到的式(4.6)如下:

$$\Delta U_{BD} = E_1 \frac{R_1 \Delta R_3 + R_3 \Delta R_1 - R_2 \Delta R_4 - R_4 \Delta R_2}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \quad (4.6)$$

上式为电桥因电阻变化而引起的电桥输出端的电压的变化。若电桥的四个桥臂为相同的四枚电阻应变片,其初始电阻相等,即有 $R_1=R_2=R_3=R_4=R$,则式(4.6)可改写为式(4.7)如下:

$$\Delta U_{BD} = \frac{E_1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (4.7)$$

结合式: $\Delta R/R=KS\Delta L/L$,则式(4.7)改写为如下的式(4.8):

$$\Delta U_{BD} = \frac{E_1 K}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (4.8)$$

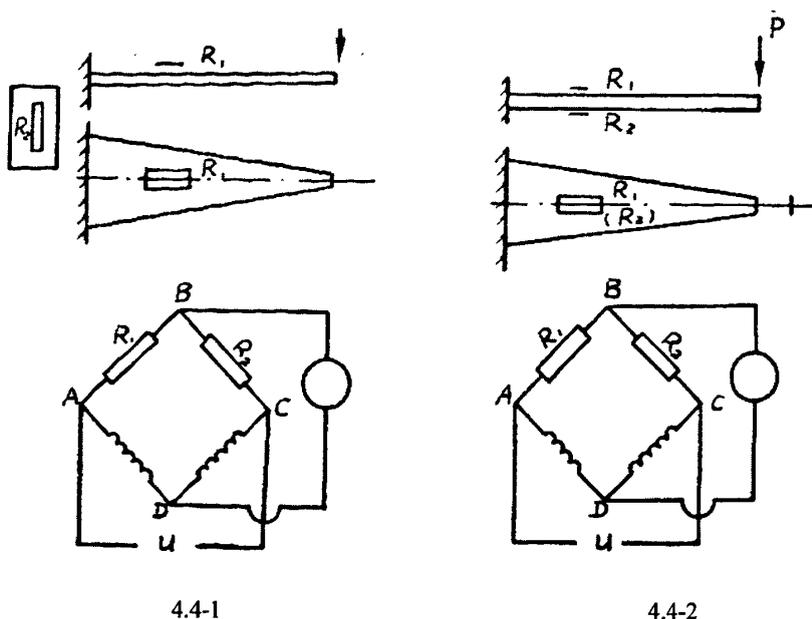
由式(4.8)可以看出:电桥的输出电压 ΔU_{BD} 与各桥臂上应变片的应变代数和成线性关系。这关系为建立以电桥电路测量应变的理论基础。

ΔU_{BD} 经标定后由应变仪直接读出应变数值为: $\varepsilon_r = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4$

式(4.8)还表明:相邻桥臂的电阻变化率(或应变)相减,相对桥臂的电阻变化率(或应变)相加。在电测应力实验分析中利用这一性质,可以通过合理的粘贴应变片,提高测量灵敏度,降低测量误差。在弹性范围内,电测误差低于 0.5%。

在图 4.3 的电桥中,如果四个桥臂 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 均为电阻应变片,这种电桥就称为全桥测量电路,在全桥接法情形下,应变仪的读数为四个桥臂 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 的应变的代数和。即按式(4.8)计算后得: $\varepsilon_r = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4$

在图 4.3 电桥中,如果四个桥臂中只有 R_1 、 R_2 为电阻应变片,而 R_3 、 R_4 为标准电阻,这种电桥就称为半桥测量电路,采用 YJ-26 型静态电阻应变仪时,其半桥接线电路如下图所示:



4.4-1

4.4-2

图 4.4 半桥接线与测量

Fig 4.4 Half-bridge connection and measurement

如果应变片 R_1 接于应变仪 AB 接线柱，温度补偿片 R_2 接于 BC 接线柱，则构成外半桥，如图 4.4-1，另内半桥由应变仪内部两个无感绕线电阻构成。应变仪读出的应变值为：

$$\varepsilon = \varepsilon_1$$

若梁上同一截面处的压区和拉区分别贴应变片 R_1 和 R_2 接于 AB 和 BC 接线柱构成外半桥，如图 4.4-2，两电阻应变片则互为补偿，应变仪读出应变值为：

$$\varepsilon = \varepsilon_1 - \varepsilon_2$$

又因 $\varepsilon_1 = -\varepsilon_2$ ，所以有：

$$\varepsilon = 2\varepsilon_2$$

在半桥测量中如果只有一枚电阻应变片产生机械变形，另一枚不参与机械应变，则称为单臂测量。在半刚性基层材料的收缩系数测定试验中通常采用半桥测量的方法。

2) 试验方法

a. 试件制备

根据混合料的最大干密度和最佳含水量计算装模质量，采用静压法制作 $50\text{mm} \times 50\text{mm} \times 240\text{mm}$ 的梁式试件，成型后立即用塑料薄膜包裹置于 $25 \pm 2^\circ\text{C}$ 的环境条件

下养生 28 天以备使用。

b. 试件养生初期打磨

试件养生 1~2 天后, 将试件上的塑料保鲜膜暂时取掉, 对于表面粗糙的试件来说, 在试件表面上预定的贴片区用相应的结合料浆(水泥粉煤灰稳定类用水泥浆, 石灰粉煤灰稳定类用石灰浆)涂上一层, 然后重新用保鲜膜包裹试件, 养生 7 天后需要对涂层进行打磨, 打磨的标准是: 涂层能够填充试件表面的孔隙或坑槽, 但不能成层。

c. 应变片的粘贴

将养生 28 天后的试件放入 $105^{\circ}\text{C}\sim 110^{\circ}\text{C}$ 的烘箱中烘 12 小时至试件干燥, 用砂布对试件表面进行再次打磨, 并涂上一层环氧树脂胶作为粘贴应变片的底胶。将涂上底胶的试件放在自然环境中 24 小时使环氧树脂胶固化。底胶干后, 用细砂纸打磨直到胶膜透明为止, 即越薄越好。为使应变计更好地与试件粘贴, 打磨方向应与应变片为 45° 角。打磨时注意底胶平整, 然后用棉花擦净其上尘土或粉末。打磨后开始粘贴应变片, 在欲贴片位置涂上薄薄一层 502 胶水, 确认贴片正反面后将电阻应变片一端轻轻放在预定位置, 快速又准确地校正其方向, 然后盖上玻璃纸, 朝一个方向滚压应变片, 挤出气泡和过量的胶水, 保证胶水尽可能薄而均匀切应变片与底胶间不留空隙, 在应变计周围应有胶结剂溢出才是正常状态, 注意应避免应变片引出线被粘连。

d. 电线连接

粘贴好应变片的试件在室温条件下放置几个小时即可进行电线与应变片之间的焊接工作。使用小型电烙铁和焊锡将应变片引出线与电线焊接, 为避免应变片引出线或电线碰触引起短路影响测量效果, 将外露的引出线和电线部分使用绝缘胶布包裹。温度补偿试件上的应变片的采用相同焊接方法。参照 YJ-26 型静态电阻应变仪适用说明, 将被测试件和温度补偿试件的导线接入应变仪配套的预调平衡箱, 若测量试件较多可采用多个预调平衡箱, 并将预调平衡箱与应变仪用专用导线连接。

e. 环境箱温度变化的设定

采用可编程高低温交变环境箱, 温度变化范围为 $50^{\circ}\text{C}\sim -20^{\circ}\text{C}$, 降温速率为 $0.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 降温间隔 10°C 每个温度的恒温时间为 2 小时, 试件放入前环境箱的初始温度设定为温缩测量的最高温度 50°C 。

f. 温缩测量

将接好线的试件和温度补偿片一起放入高低温交变环境箱中。试件横向卧式放置, 底面垫置可滚动的光圆钢筋, 关好箱门。恒温约 3 小时后, 试件达到开始温度后, 启动环境箱温度控制程序, 对应变仪各测试通道进行电容、电阻平衡调节, 开

始读数并记录应变值。可编程高低温交替环境箱自动控制内部温度，在设定温度恒温结束后自动转入下一个设定温度，因此应在每个恒温段快要结束前的 3~5 分钟内快速完成读数，避免数据的丢失。

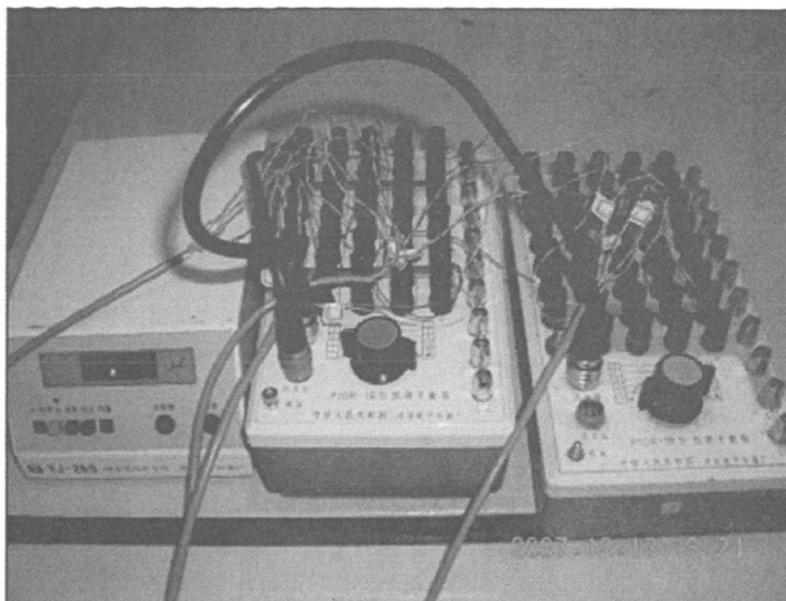


图 4.5 YJ-26 型静态电阻应变仪及两个配套预调平衡箱

Fig 4.5 YJ-26-type static resistance strain gauge and the two pre-set balance supporting boxes

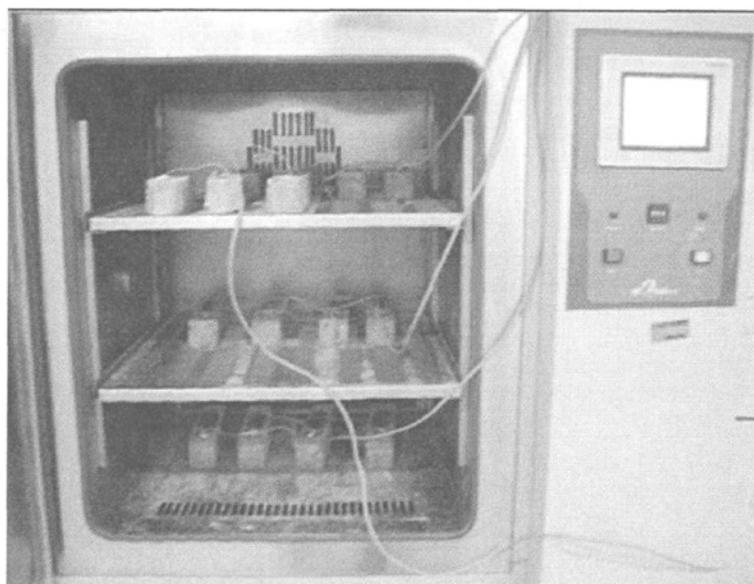


图 4.6 试件放入可编程高低温交替环境箱

Fig 4.6 Specimens was put in the alternating programmable high and low temperature environment box

4.2 水泥粉煤灰稳定碎石混合料的干缩性能

C1、C2、C3、C5 四种水泥粉煤灰稳定碎石混合料的干缩试验结果如下：

表 4.1 水泥粉煤灰稳定碎石 C1 (3:27:70) 干缩实验数据

Table 4.1 The shrinkage test results of cement and fly-ash stabilized crushed-stones C1(3: 27:70)

观测 天数	千分表读数	试件质量	干缩应变	失水量	平均失 水率	干缩系数	平均干缩 系数
	(μm)	(g)	($\mu\epsilon$)	(g)	%	($\mu\epsilon/\%$)	($\mu\epsilon/\%$)
0	0	1390.4	0.00		0.00		
1	5	1386.0	19.55	4.4	0.34	58	63
2	8	1383.2	33.51	7.2	0.55	64	
3	11	1380.9	44.68	9.4	0.73	65	
4	13	1379.3	53.06	11.1	0.85	67	
5	15	1377.6	61.44	12.8	0.98	63	
6	17	1376.3	69.81	14.1	1.09	83	
7	19	1374.2	80.98	16.2	1.24	72	
8	22	1372.4	92.15	18.0	1.38	79	
9	25	1369.3	106.12	21.1	1.62	58	
10	27	1367.3	114.49	23.1	1.77	56	
11	29	1365.6	122.87	24.8	1.91	63	
12	33	1363.2	136.84	27.2	2.09	75	
13	35	1361.3	145.21	29.1	2.23	60	
14	38	1359.3	156.38	31.1	2.39	72	
15	40	1357.0	167.55	33.4	2.57	62	
16	42	1355.2	175.93	35.2	2.70	63	
17	44	1353.4	184.31	37.0	2.84	60	
18	46	1351.6	192.69	38.8	2.98	60	
19	48	1350.0	201.06	40.4	3.11	67	
20	50	1348.2	209.44	42.2	3.24	63	
21	52	1346.4	217.82	44.0	3.38	60	
22	54	1344.7	226.20	45.7	3.51	63	
23	56	1343.5	231.78	46.9	3.61	60	
24	57	1342.2	237.37	48.2	3.70	60	
25	58	1340.8	242.95	49.6	3.81	51	
26	60	1339.5	248.54	50.9	3.91	55	
27	61	1338.2	254.12	52.2	4.01	55	
28	62	1337.5	256.91	52.9	4.07	51	

表 4.2 水泥粉煤灰稳定碎石 C3 (3:22:75) 干缩实验数据

Table 4.2 The shrinkage test results of cement and fly-ash stabilized crushed-stones C2(3: 22:75)

观测 天数	千分表 读数	试件质量	干缩应变	失水量	平均失 水率	干缩系数	平均干缩系 数
	(μm)	(g)	($\mu\epsilon$)	(g)	%	($\mu\epsilon/\%$)	($\mu\epsilon/\%$)
0	0	1419.9	0.00				
1	5.6	1411.1	23.13	8.8	0.66	35	58
2	8.5	1404.9	35.21	15.0	1.12	26	
3	11	1401.9	45.83	18.1	1.35	47	
4	15.4	1398.4	64.17	21.5	1.61	71	
5	19.0	1395.9	79.17	24.0	1.80	79	
6	22.5	1393.4	93.75	26.5	1.98	80	
7	26.1	1391.2	108.54	28.7	2.15	89	
8	29.8	1389.3	124.17	30.6	2.29	108	
9	32.7	1387.2	136.04	32.7	2.44	78	
10	35.5	1385.4	147.92	34.5	2.58	87	
11	38.1	1383.5	158.80	36.4	2.72	76	
12	40.3	1381.8	167.71	38.2	2.85	69	
13	42.5	1380.1	176.88	39.8	2.97	76	
14	44.4	1378.5	185.00	41.4	3.09	67	
15	45.7	1377.1	190.42	42.8	3.20	51	
16	46.8	1375.8	194.79	44.2	3.30	44	
17	47.9	1374.5	199.58	45.5	3.40	49	
18	48.0	1374.4	200.04	45.6	3.41	60	
19	48.3	1374.0	201.04	45.9	3.43	44	
20	48.4	1373.8	201.67	46.1	3.44	41	
21	48.6	1373.6	202.50	46.3	3.46	44	
22	48.8	1373.3	203.33	46.6	3.48	44	
23	49.0	1373.1	204.17	46.8	3.50	55	
24	49.2	1372.9	205.00	47.1	3.52	42	
25	49.4	1372.6	205.83	47.3	3.53	46	
26	49.6	1372.4	206.67	47.6	3.55	41	
27	49.8	1372.1	207.29	47.8	3.57	39	
28	50.0	1371.8	208.13	48.1	3.59	34	

表 4.3 水泥粉煤灰稳定碎石 C3 (3:17:80) 干缩实验数据

Table 4.3 The shrinkage test results of cement and fly-ash stabilized crushed-stones C3(3:17:80)

观测 天数	千分表 读数	试件质量	干缩应变	失水量	平均失 水率	干缩系数	平均干缩 系数
	(μm)	(g)	(μe)	(g)	%	($\mu\text{e}/\%$)	($\mu\text{e}/\%$)
0	0.0	1425.8	0.00				
1	5.7	1417.7	23.62	8.1	0.59	40	55
2	8.9	1412.7	36.88	13.1	0.95	36	
3	12.2	1410.7	50.75	15.1	1.10	95	
4	16.1	1408.6	67.18	17.2	1.25	108	
5	19.3	1407.2	80.62	18.6	1.36	131	
6	22.4	1405.7	93.42	20.1	1.46	118	
7	25.0	1402.9	104.08	22.9	1.67	52	
8	27.5	1400.8	114.60	25.0	1.82	68	
9	29.8	1397.8	124.35	28.0	2.04	45	
10	31.7	1395.8	131.97	30.0	2.19	53	
11	33.3	1394.6	138.85	31.2	2.27	79	
12	34.7	1392.9	144.47	32.9	2.40	45	
13	35.7	1391.6	148.89	34.2	2.49	47	
14	37.0	1389.9	154.07	35.9	2.62	42	
15	37.5	1389.1	156.20	36.7	2.67	37	
16	38.1	1387.7	158.95	38.1	2.78	27	
17	39.0	1386.0	162.60	39.8	2.90	29	
18	39.4	1385.5	163.98	40.3	2.94	43	
19	39.5	1385.4	164.74	40.5	2.95	65	
20	39.7	1385.0	165.50	40.8	2.97	31	
21	39.8	1384.9	165.80	40.9	2.98	46	
22	39.9	1384.7	166.41	41.1	3.00	31	
23	40.0	1384.6	166.64	41.3	3.01	31	
24	40.1	1384.4	167.04	41.4	3.02	42	
25	40.2	1384.4	167.33	41.4	3.02	59	
26	40.3	1384.2	167.74	41.6	3.03	42	
27	40.4	1384.1	168.14	41.7	3.04	54	
28	40.4	1384.0	168.39	41.8	3.04	44	

表 4.4 水泥粉煤灰稳定碎石 C5 (4:21:75) 干缩实验数据

Table 4.4 The shrinkage test results of cement and fly-ash stabilized crushed-stones C5(4:21:75)

观测 天数	千分表 读数	试件质量	干缩应变	失水量	平均失 水率	干缩系数	平均干缩 系数
	(μm)	(g)	($\mu\epsilon$)	(g)	%	($\mu\epsilon/\%$)	($\mu\epsilon/\%$)
0	0.0	1400.0	0.00				
1	5.8	1392.7	24.36	7.3	0.55	45	68
2	13.6	1382.4	56.67	17.6	1.32	42	
3	16.5	1380.1	68.58	19.9	1.49	69	
4	20.8	1376.0	86.59	24.0	1.79	59	
5	26.6	1372.5	110.95	27.5	2.06	93	
6	29.7	1370.0	123.66	30.0	2.24	68	
7	33.9	1368.2	141.14	31.8	2.38	130	
8	41.4	1363.7	172.38	36.3	2.71	93	
9	46.0	1360.6	191.71	39.4	2.94	83	
10	48.0	1359.4	199.92	40.6	3.03	92	
11	49.5	1357.5	206.37	42.5	3.18	45	
12	52.9	1355.4	220.31	44.6	3.33	89	
13	55.5	1353.3	231.17	46.7	3.49	69	
14	58.8	1351.2	245.20	48.8	3.65	89	
15	61.6	1349.1	256.59	50.9	3.80	73	
16	62.9	1348.4	261.88	51.6	3.86	101	
17	65.8	1346.2	274.33	53.8	4.02	77	
18	66.3	1345.8	276.45	54.2	4.05	66	
19	66.8	1345.4	278.30	54.6	4.08	58	
20	67.3	1344.9	280.42	55.1	4.12	66	
21	67.9	1344.5	283.07	55.5	4.15	82	
22	68.1	1344.2	283.86	55.8	4.17	39	
23	68.3	1344.1	284.66	55.9	4.18	63	
24	68.5	1343.8	285.45	56.2	4.20	46	
25	68.7	1343.6	286.25	56.4	4.22	43	
26	68.9	1343.3	287.04	56.7	4.24	37	
27	69.1	1343.1	287.83	56.9	4.25	53	
28	69.3	1342.8	288.58	57.2	4.27	39	

4.2.1 平均干缩系数

平均干缩系数(α_d)是某失水量时,试件的干缩应变与试件的失水率之比($\times 10^{-6}$),通常可以直接反映材料或混合料的干燥收缩性能。水泥与黔北电厂粉煤灰稳定碎石的平均干缩系数试验结果如表 4.5 所示:

表 4.5 水泥粉煤灰稳定碎石平均干缩系数对比

Table 4.5 Comparison of the average shrinkage factor between cement and fly-ash stabilized crushed-stones

混合料类型	C1	C2	C3	C5
平均干缩系数 ($\mu \varepsilon / \%$)	63	58	55	68

水泥粉煤灰稳定碎石平均干缩系数对比图

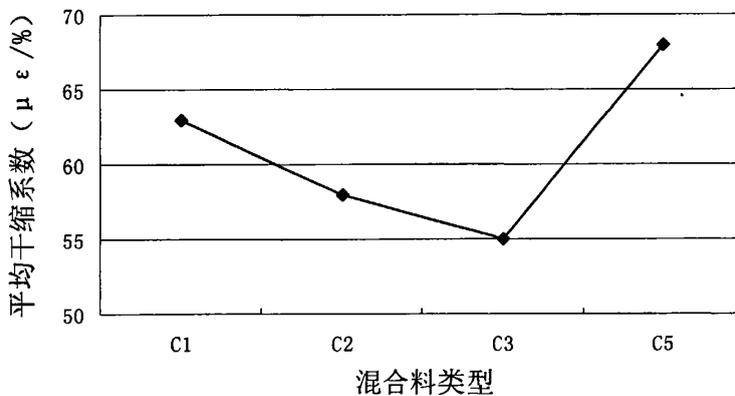


图 4.7 水泥粉煤灰稳定碎石平均干缩系数对比图

Fig 4.7 Comparison of the average shrinkage factor between cement and fly-ash stabilized crushed-stones

对比可知: ①C1、C2、C3 三种混合料中, 水泥: 粉煤灰: 碎石比例分别为 3: 27: 70、3: 22: 75、3: 17: 80, 平均干缩系数分别为 63、58、55, 可见水泥粉煤灰稳定碎石的平均干缩系数随着水泥粉煤灰含量的减少逐渐减小。

②从 C1 到 C2, 水泥粉煤灰含量从 30% 下降到 25%, 平均干缩系数下降值为 5; 从 C2 到 C3, 水泥粉煤灰含量从 25% 下降到 20%, 平均干缩系数下降值为 3。可见随水泥粉煤灰含量的减小, 水泥粉煤灰稳定碎石的平均干缩系数减小速度为非线性的, 呈逐渐降低趋势。

③对比 C2 和 C5, 前者水泥: 粉煤灰: 碎石比例分别为 3: 22: 75, 后者为 4: 21: 75。水泥粉煤灰含量均为 25%, 平均干缩系数分别为 58 和 68, 可见水泥含量的增加对水泥粉煤灰稳定碎石平均干缩系数的增加有着显著的影响。

④对比 C1 和 C5, 水泥: 粉煤灰: 碎石比例分别为 3: 27: 70、4: 21: 75。。

C5 的水泥含量较 C1 增加了 1%，同时粉煤灰含量减少了 6%。尽管 C1 中 30% 的水泥粉煤灰含量高于 C5 的 25%，其 63 的平均干缩系数却低于 C5 的 68，可见水泥含量对平均干缩系数的影响要远高于粉煤灰含量。

4.2.2 时间-干缩系数关系

水泥粉煤灰稳定碎石的干缩系数在失水速率等多种因素影响下，从混合料干燥收缩初期到后期不停变化，干缩系数与时间关系如图 4.8 所示：

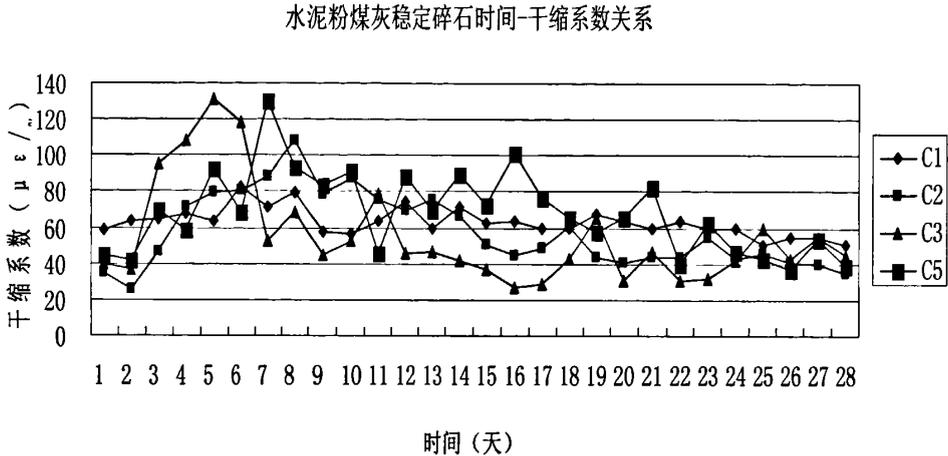


图 4.8 水泥粉煤灰稳定碎石时间-干缩系数关系图

Fig 4.8 The relationship between time and shrinkage factor of cement and fly-ash stabilized crushed-stones

由上图可知：①水泥粉煤灰稳定碎石的干缩系数随着时间推移也有所变化，在前期干缩系数呈增加趋势，9 天过后有所降低，14 天之后趋于平稳。

②早期干缩系数排序 $C1 > C5 > C3 > C2$ ，之后 14 天左右排序为 $C5 > C1 > C2 > C3$ ，后期干缩系数趋于稳定，由于失水量较小，收缩应变同样很小，测量误差导致干缩系数与 14 天左右出现不同。

③对比 C2 与 C5，后者较前者水泥含量增加 1%，粉煤灰含量下降 6%，干缩系数通常高于 C2，可见水泥含量的增加对干缩系数的增加起着重要作用，高于粉煤灰含量降低的影响。

4.2.3 时间-干缩应变关系

从混合料干燥收缩初期到后期，水泥粉煤灰稳定碎石的干缩应变随着时间的增长逐渐增长，干缩应变与时间关系如图 4.9 所示：

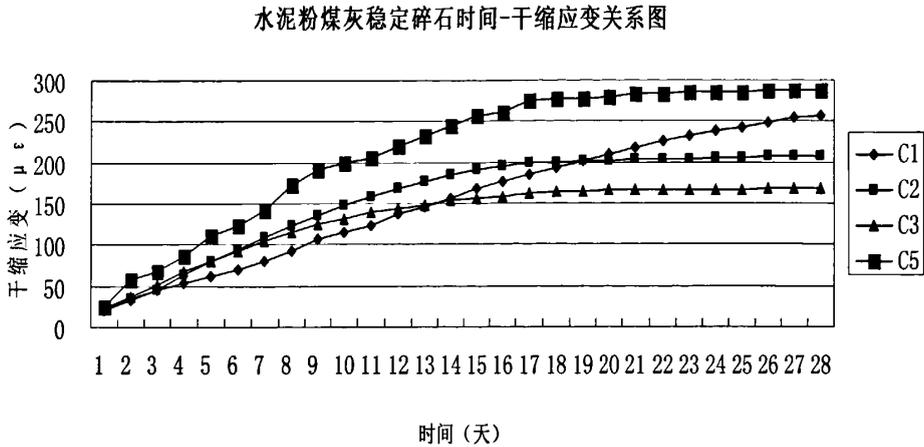


图 4.9 水泥粉煤灰稳定碎石时间-干缩应变关系

Fig 4.9 The relationship between time and shrinkage strain of cement and fly-ash stabilized crushed-stones

由上图可知:

①水泥粉煤灰稳定碎石的干缩应变随着时间推移逐渐增加,其增加速度先快后慢,逐渐减缓。

②在 13 天之前,几种水泥粉煤灰稳定碎石的干缩应变大小为 $C5 > C2 > C3 > C1$, 13 天之后为 $C5 > C1 > C2 > C3$, 可见 C1 的后期干缩量明显高于其他几种混合料,这与 C1 中 30% 的水泥粉煤灰含量有着密切关系。

③对比 C2 与 C5, C5 的干缩应变从一开始就远远高于 C2, 可见水泥含量的增加将大大提高水泥粉煤灰稳定碎石混合料的干缩应变。

④对比 C5 与 C1, 前者较后者水泥含量增加了 1%, 粉煤灰含量减小了 6%, 但 C5 的干缩应变远远高于 C1, 可见水泥含量的增加对于干缩应变的影响要远高于粉煤灰含量减小的影响。

4.2.4 失水率-干缩应变关系

为考察水泥粉煤灰稳定碎石的干缩性能,此处研究水泥粉煤灰稳定碎石混合料的失水率与干缩应变之间的关系,如图 4.10 所示:

水泥粉煤灰稳定碎石失水率-干缩应变关系图

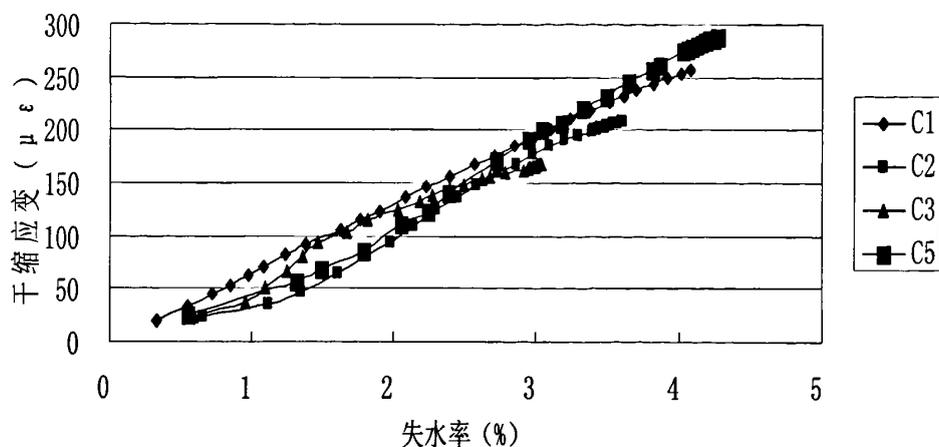


图 4.10 水泥粉煤灰稳定碎石的失水率-干缩应变关系

Fig 4.10 The relationship between shrinkage strain and water loss rate of cement and fly-ash stabilized crushed-stones

由上图可知：

① C1、C2、C3、C5 几种水泥粉煤灰稳定碎石的干缩应变随着失水率的增加也逐渐增加。

② 失水率在 2%~3%之间时，干缩应变增长规律有所变化，C5 增长速度超过 C1，C2 增长速度超过 C3。

③ 对比 C2 与 C5，相同失水率情况下 C5 的干缩应变要高于 C2，可见水泥含量的增加对干缩应变的增加起积极作用。

④ C5 的 28 天失水率接近 4.5%，C1 刚过 4%，C2 接近 4%，C3 则刚过 3%，其失水率排序为 C5>C1>C2>C3，这与水泥含量及水泥粉煤灰整体含量有关。

4.3 石灰粉煤灰稳定碎石混合料的干缩性能

L2、L3、L4 三种石灰粉煤灰稳定碎石混合料的干缩试验结果如下：

表 4.6 石灰粉煤灰稳定碎石 L2 (4: 21:75) 干缩实验数据

Table 4.6 The shrinkage test results of lime and fly-ash stabilized crushed-stones L2(4:21:75)

观测 天数	千分表 读数	试件质量	干缩应变	失水量	平均失 水率	干缩系数	平均干缩系 数
	(μm)	(g)	(μE)	(g)	%	($\mu\text{E}/\%$)	($\mu\text{E}/\%$)
0	0.0	1374.64	0.00				
1	13.2	1361.44	54.80	13.2	1.02	54	94
2	23.0	1354.44	95.90	20.2	1.56	76	
3	29.6	1351.64	123.31	23	1.77	127	
4	36.3	1348.84	151.39	25.8	1.99	130	
5	42.7	1346.24	178.11	28.4	2.19	133	
6	49.7	1343.24	206.88	31.4	2.42	124	
7	55.9	1340.24	232.91	34.4	2.65	113	
8	62.6	1337.24	261.00	37.4	2.88	121	
9	69.5	1334.24	289.77	40.4	3.12	124	
10	75.8	1331.24	315.87	43.4	3.35	113	
11	79.6	1328.24	331.55	46.4	3.58	68	
12	88.8	1325.24	369.92	49.4	3.81	166	
13	97.0	1322.24	404.17	52.4	4.04	148	
14	101.9	1319.24	424.72	55.4	4.27	89	
15	102.9	1318.84	428.83	55.8	4.30	133	
16	103.6	1318.44	431.57	56.2	4.33	89	
17	104.2	1317.97	434.31	56.67	4.37	76	
18	104.9	1317.64	437.05	57	4.40	108	
19	105.5	1317.24	439.79	57.4	4.43	89	
20	105.9	1316.94	441.16	57.7	4.45	59	
21	106.9	1316.44	445.27	58.2	4.49	107	
22	107.0	1316.3	445.95	58.34	4.50	63	
23	107.4	1316.06	447.32	58.58	4.52	74	
24	107.6	1315.84	448.35	58.8	4.54	61	
25	108.0	1315.48	450.06	59.16	4.56	62	
26	108.3	1314.84	451.43	59.8	4.61	28	
27	108.7	1314.54	452.80	60.1	4.64	59	
28	108.8	1314.34	453.49	60.3	4.65	44	

表 4.7 石灰粉煤灰稳定碎石 L3 (4: 16:80) 干缩实验数据

Table 4.7 The shrinkage test results of lime and fly-ash stabilized crushed-stones L3(4:16:80)

观测 天数	千分表 读数	试件质量 (g)	干缩应变 ($\mu\epsilon$)	失水量 (g)	平均失水率 %	干缩系数 ($\mu\epsilon/\%$)	平均干缩 系数 ($\mu\epsilon/\%$)
	(μm)						
0	0.0	1406.30	0.00				
1	5.2	1397.54	21.75	8.75	0.66	33	87
2	7.1	1394.90	29.60	11.40	0.86	39	
3	11.6	1392.72	48.33	13.57	1.03	114	
4	14.5	1390.55	60.45	15.74	1.19	74	
5	20.4	1388.38	85.19	17.92	1.35	151	
6	25.5	1386.21	106.33	20.09	1.52	129	
7	30.2	1384.04	125.67	22.26	1.68	118	
8	37.4	1381.87	155.88	24.43	1.85	184	
9	42.9	1379.69	178.83	26.60	2.01	140	
10	50.6	1377.52	210.85	28.78	2.17	195	
11	53.0	1375.35	220.82	30.95	2.34	61	
12	55.0	1373.18	228.98	33.12	2.50	50	
13	65.5	1368.97	273.08	37.33	2.82	139	
14	72.5	1364.76	302.08	41.53	3.14	91	
15	76.3	1362.79	317.79	43.50	3.29	106	
16	79.6	1361.37	331.69	44.93	3.40	129	
17	84.4	1359.47	351.63	46.83	3.54	139	
18	85.7	1357.57	357.27	48.73	3.68	39	
19	86.9	1355.87	361.90	50.42	3.81	36	
20	88.0	1355.13	366.52	51.17	3.87	82	
21	88.9	1354.52	370.35	51.78	3.91	83	
22	89.8	1352.61	373.98	53.68	4.06	25	
23	90.5	1351.46	377.00	54.84	4.14	35	
24	91.2	1350.17	380.02	56.13	4.24	31	
25	91.8	1349.83	382.44	56.46	4.27	94	
26	92.2	1349.22	384.25	57.08	4.31	39	
27	92.8	1348.48	386.67	57.82	4.37	43	
28	93.1	1348.00	387.88	58.30	4.41	34	

表 4.8 石灰粉煤灰稳定碎石 L4 (4: 11:85) 干缩实验数据

Table 4.8 The shrinkage test results of lime and fly-ash stabilized crushed-stones L4(4:11:85)

观测 天数	千分表 读数	试件质量 (g)	干缩应变 ($\mu\epsilon$)	失水量 (g)	平均失 水率 %	干缩系数 ($\mu\epsilon/\%$)	平均干缩 系数 ($\mu\epsilon/\%$)
	(μm)						
0	0.0	1422.50	0.00				
1	8.5	1417.20	35.49	5.3	0.39	91	75
2	20.3	1411.30	84.49	11.2	0.83	113	
3	25.0	1408.10	104.17	14.4	1.06	83	
4	31.6	1404.80	131.56	17.7	1.31	112	
5	34.4	1401.57	143.52	20.9	1.55	50	
6	44.7	1398.32	186.34	24.2	1.79	179	
7	48.0	1395.07	199.85	27.4	2.02	56	
8	50.5	1391.82	210.26	30.7	2.26	43	
9	53.3	1388.57	222.22	33.9	2.50	50	
10	58.1	1385.32	241.90	37.2	2.74	82	
11	62.8	1382.40	261.57	40.1	2.96	91	
12	66.6	1380.70	277.39	41.8	3.09	126	
13	68.2	1379.40	284.34	43.1	3.18	72	
14	70.5	1378.10	293.60	44.4	3.28	96	
15	73.8	1376.80	307.48	45.7	3.37	145	
16	75.8	1375.50	315.97	47.0	3.47	88	
17	77.0	1374.20	320.99	48.3	3.57	52	
18	78.0	1373.05	324.85	49.5	3.65	45	
19	79.4	1371.84	331.02	50.7	3.74	69	
20	80.7	1370.78	336.42	51.7	3.82	69	
21	82.3	1369.40	342.98	53.1	3.92	64	
22	83.5	1368.40	347.99	54.1	3.99	68	
23	84.8	1367.00	353.40	55.5	4.10	52	
24	86.1	1365.90	358.80	56.6	4.18	67	
25	87.7	1364.40	365.35	58.1	4.29	59	
26	89.0	1362.50	370.76	60.0	4.43	39	
27	89.5	1361.20	373.07	61.3	4.52	24	
28	90.2	1359.50	375.77	63	4.65	22	

4.3.1 平均干缩系数

平均干缩系数(α_d)是某失水量时,试件的干缩应变与试件的失水率之比($\times 10^{-6}$),通常可以直接反映材料或混合料的干燥收缩性能。石灰与黔北电厂粉煤灰稳定碎石的平均干缩系数试验结果如表 4.9 所示:

表 4.9 石灰粉煤灰稳定碎石平均干缩系数对比

Table 4.9 Comparison of the average shrinkage factor between lime and fly-ash stabilized crushed-stones

混合料类型	L2	L3	L4
平均干缩系数 ($\mu \varepsilon / \%$)	94	87	75

石灰粉煤灰稳定碎石平均干缩系数对比图

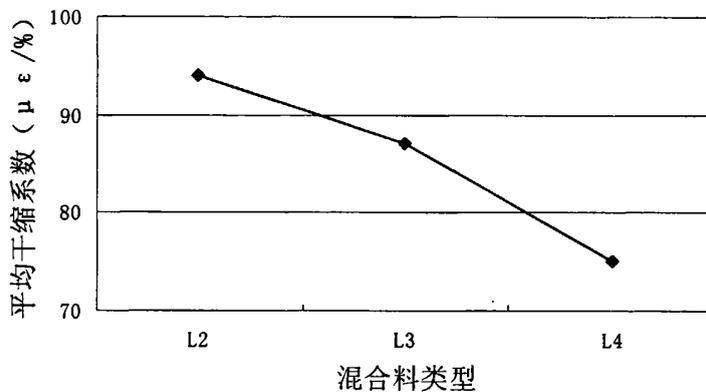


图 4.11 石灰粉煤灰稳定碎石平均干缩系数对比图

Fig 4.11 Comparison of the average shrinkage factor between lime and fly-ash stabilized crushed-stones

对比可知: ①L2、L3、L4 三种混合料中, 石灰: 粉煤灰: 碎石比例分别为 4: 21: 75、4: 16: 80、4: 11: 85, 平均干缩系数分别为 94、87、75, 可见石灰粉煤灰稳定碎石的平均干缩系数随着石灰粉煤灰含量的降低逐渐减小。

②从 L2 到 L3, 石灰粉煤灰含量从 25% 下降到 20%, 平均干缩系数下降值为 7; 从 L3 到 L4, 石灰粉煤灰含量从 20% 下降到 15%, 平均干缩系数下降值为 8。可见随石灰粉煤灰含量的减小, 石灰粉煤灰稳定碎石的平均干缩系数减小速度为非线性的, 呈逐渐加快趋势。

③对比 L2 和 C5, 前者石灰: 粉煤灰: 碎石比例为 4: 21: 75, 后者水泥: 粉煤灰: 碎石比例为 4: 21: 75。石灰粉煤灰和水泥粉煤灰含量均为 25%, 平均干缩系数分别为 94 和 68, 水泥等量替代石灰后, 水泥粉煤灰稳定碎石的平均干缩系数

远低于替代前的石灰粉煤灰稳定碎石的平均干缩系数,可见用水泥替代石灰来减小二灰碎石的平均干缩系数是十分有效的。

④长安大学杨文丁的硕士论文《半刚性基层材料收缩性能研究》中石灰:碎石:粉煤灰=4:11:85的混合料平均干缩系数为85.4,本文中相同配合比L4的平均干缩系数为75,低于前者。

4.3.2 时间-干缩系数关系

石灰粉煤灰稳定碎石的干缩系数在失水速率等多种因素影响下,从混合料干燥收缩初期到后期不停变化,干缩系数与时间关系如图4.12所示:

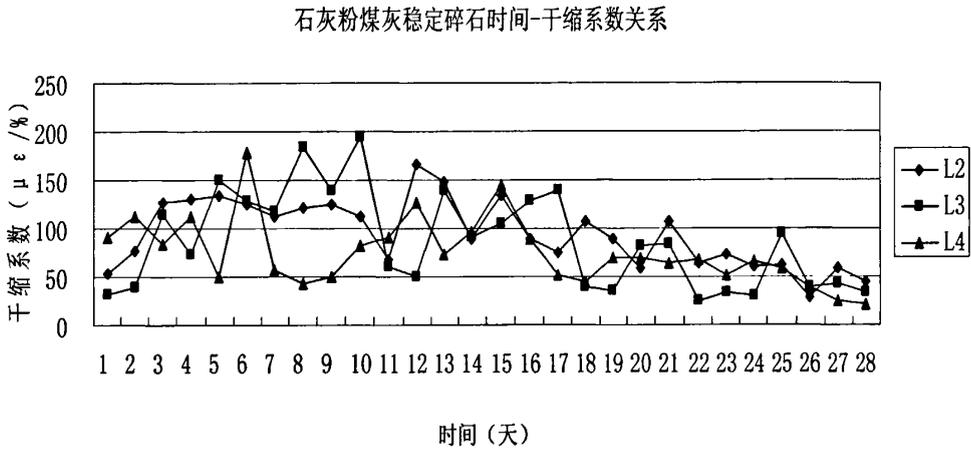


图 4.12 石灰粉煤灰稳定碎石时间-干缩系数关系图

Fig 4.12 The relationship between time and shrinkage factor of lime and fly-ash stabilized crushed-stones

由上图可知:①石灰粉煤灰稳定碎石的干缩系数随着时间推移也有所变化,在前期干缩系数呈增加趋势,10天过后有所降低,17天之后趋于平稳。

②早期干缩系数排序 $L4 > L3 > L2$, 之后17天左右排序为 $L3 > L2 > L4$, 后期干缩系数趋于稳定,按大小排序为 $L2 > L3 > L4$, 与平均干缩系数排序 $L2 > L3 > L4$ 一致。

③对比C5与L2,前者用等量水泥替代了后者中的石灰,替代后干缩系数一般低于L2,且干缩系数的变化幅度较小,可见用水泥替代石灰形成的水泥粉煤灰稳定碎石的干缩系数要优于石灰粉煤灰稳定碎石。

4.3.3 时间-干缩应变关系

从混合料干燥收缩初期到后期,石灰粉煤灰稳定碎石的干缩应变随着时间的增长逐渐增长,干缩应变与时间关系如图4.13所示:

石灰粉煤灰稳定碎石时间-干缩应变关系图

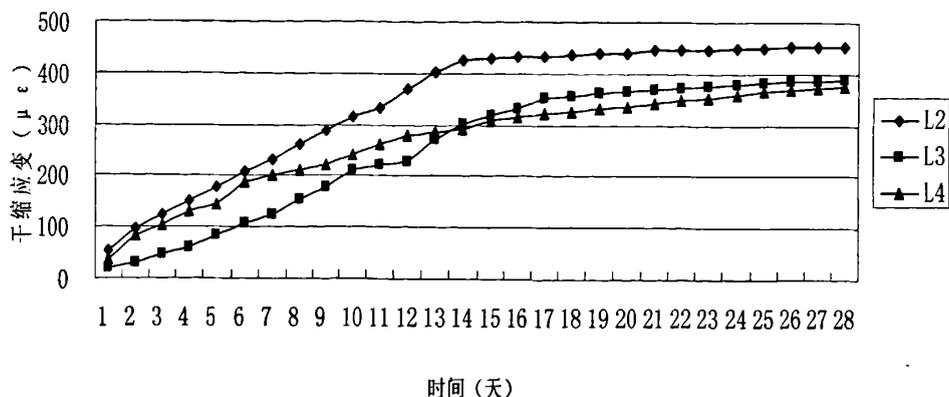


图 4.13 石灰粉煤灰稳定碎石时间-干缩应变关系图

Fig 4.13 The relationship between time and shrinkage strain of lime and fly-ash stabilized crushed-stones

4.3.4 失水率-干缩应变关系

为考察石灰粉煤灰稳定碎石的干缩性能, 此处研究石灰粉煤灰稳定碎石混合料的失水率与干缩应变之间的关系, 如图 4.14 所示:

石灰粉煤灰稳定碎石失水率-干缩应变关系图

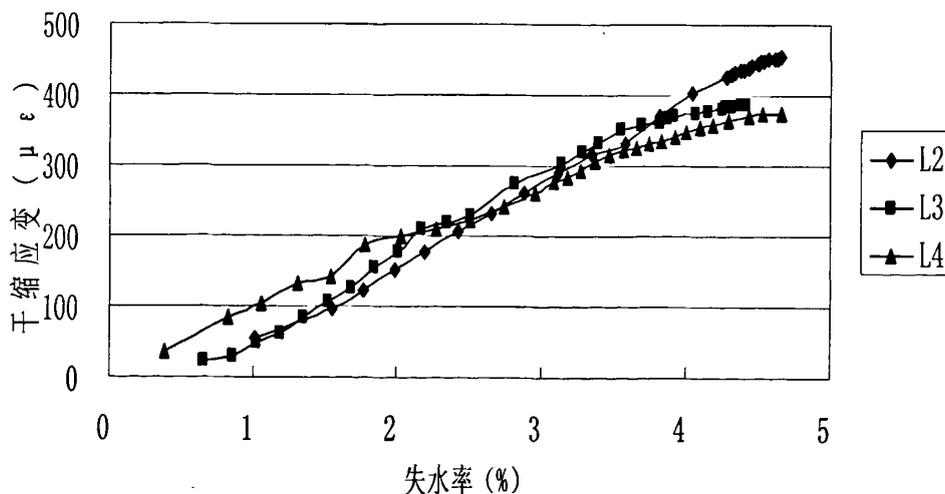


图 4.14 石灰粉煤灰稳定碎石的失水率-干缩应变关系图

Fig 4.14 The relationship between shrinkage strain and water loss rate of lime and fly-ash stabilized crushed-stones

由上图可知：

①L2、L3、L4 几种石灰粉煤灰稳定碎石的干缩应变随着失水率的增加也逐渐增加。

②失水率在 2%~3%之间时，干缩应变增长规律有所变化，L2 的增长速度超过 L3 和 L4。

③L2、L3、L4 几种石灰粉煤灰稳定碎石混合料的 28 天率均在 4.5%左右，L2 和 L4 的失水率稍高于 L3。

4.4 水泥粉煤灰稳定碎石和石灰粉煤灰稳定碎石干缩性能对比

水泥粉煤灰稳定碎石 C5 的配合比为水泥：粉煤灰：碎石=4：21：75，石灰粉煤灰稳定碎石 L2 的配合比为石灰：粉煤灰：碎石=4：21：75。将 C5 与 L2 的干缩应变进行对比，考察等量水泥替代二灰碎石混合料中的石灰后，混合料的干缩性能变化特性。

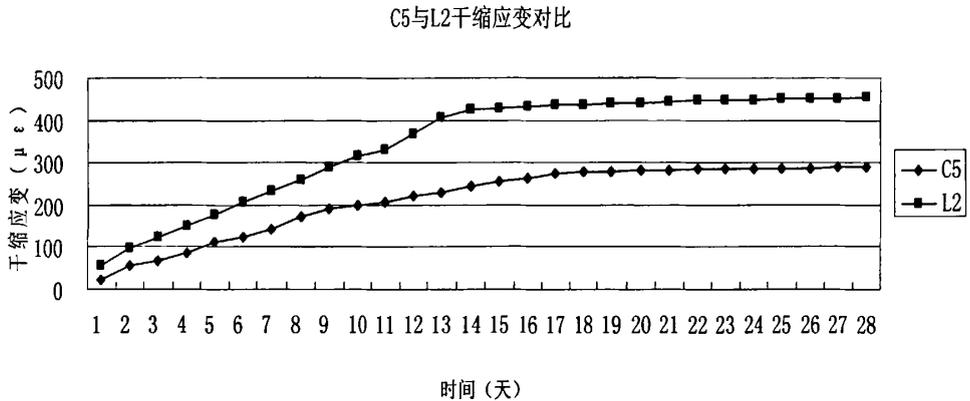


图 4.15 C5 与 L2 干缩应变对比图

Fig 4.15 Shrinkage strain comparison between C5 and L2

由上图可知：

①石灰粉煤灰稳定碎石的干缩应变随着时间推移逐渐增加，其增加速度先快后慢，逐渐减缓。

②在 14 天之前，几种石灰粉煤灰稳定碎石的干缩应变大小为 L2>L4>L3，14 天之后为 L2>L3>L4，可见 L3 的后期干缩量高于 L4。

③对比 C5 与 L2，C5 等量替代 L2 中的石灰之后，其干缩应变远远小于 L2，可见用水泥替代石灰后，水泥粉煤灰稳定碎石的干缩应变将比石灰粉煤灰稳定碎石的干缩应变大大减小。

4.5 水泥粉煤灰稳定碎石混合料的温缩性能

4.5.1 温缩应变

温缩应变 (ϵ) 是温度降低引起的试件单位长度的收缩量 ($\times 10^{-6}$), 反映了试件在温度变化时的收缩程度。水泥粉煤灰稳定碎石混合料在 $50^{\circ}\text{C} \sim -20^{\circ}\text{C}$ 温度区间里的温缩应变如表 4.10 所示:

表 4.10 水泥粉煤灰稳定碎石温缩应变

Table 4.10 Temperature shrinkage strain of cement and fly-ash stabilized crushed-stones

温度 ($^{\circ}\text{C}$)		50	40	30	20	10	0	-10	-20
温缩应变 ($\mu\epsilon$)	C1	0	119	188	269	346	416	503	569
	C2	0	105	177	248	316	385	463	535
	C3	0	101	172	247	307	371	452	514
	C5	0	127	211	282	357	422	493	554

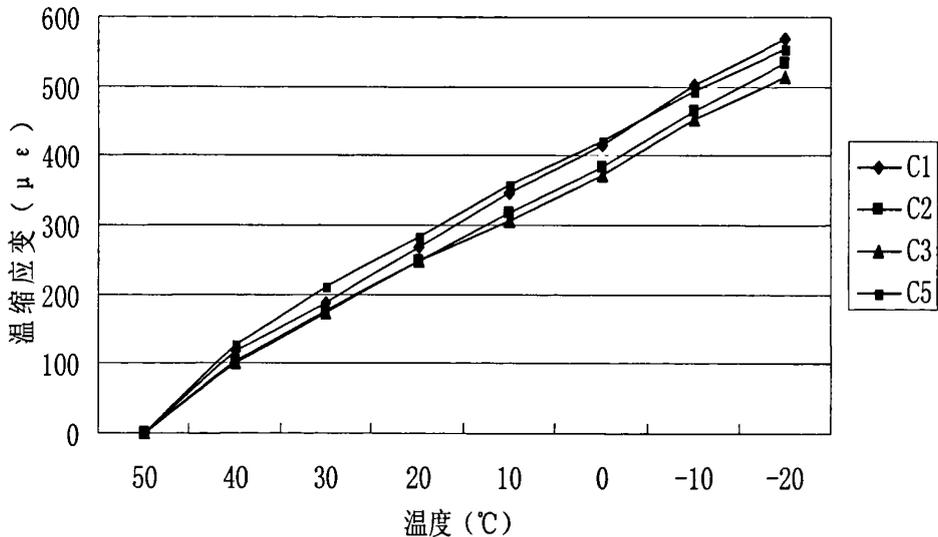


图 4.16 水泥粉煤灰稳定碎石温缩应变图

Fig 4.16 Temperature shrinkage strain of cement and fly-ash stabilized crushed-stones

由上图可知:

- ① 水泥粉煤灰稳定碎石的温缩应变随着温度的降低逐渐增大, 在 -20°C 时达到最大, 四种混合料的最终温缩应变均在 $500 \sim 600$ 之间。
- ② C1、C2、C3、C5 几种水泥粉煤灰稳定碎石的温缩应变在 -10°C 之前按大小排序为 $C5 > C1 > C2 > C3$, 之后 C5 的温缩应变增加速度低于 C1, 在 -20°C 时温缩应变按大小排序为 $C1 > C5 > C2 > C3$ 。
- ③ 对比 C2 与 C5, 后者水泥含量比前者多 1%, 粉煤灰含量少 1%。C5 的温缩应变从

50℃到-20℃均高于 C2, 可见水泥含量的增加对水泥粉煤灰稳定碎石的温缩应变增加有着重要的促进作用, 其影响效果强于粉煤灰含量的减少。

- ④ C1 相比 C2 其水泥粉煤灰含量高出 5%, C2 比 C3 高 5%, 且温缩应变大小 $C1 > C2 > C3$, 可见水泥粉煤灰含量的增加对水泥粉煤灰稳定碎石温缩系数的增加也有促进作用。
- ⑤ C1、C2、C3、C5 几种水泥粉煤灰稳定碎石在温缩试验时试件温度由 50℃ 逐渐降到 -20℃, 在这一温度区间里试件发生了温度收缩, 但此时产生的温度收缩引起的试件长度变化较小, 试验结束时仍未产生任何裂缝。当一定长度的叠加值超过水泥粉煤灰稳定碎石的极限拉应变时, 便产生收缩裂缝。

4.5.2 平均温缩系数

平均温缩系数 (β_y) 是某失水量时, 试件的温缩应变与试件的温度下降量之比 ($\times 10^{-6}$), 是直观反映材料温缩水平的指标。水泥粉煤灰稳定碎石混合料在 50℃~-20℃ 温度区间里的平均温缩系数如表 4.11 所示:

表 4.11 水泥粉煤灰稳定碎石平均温缩系数表

Table 4.11 Average temperature shrinkage factor of cement and fly-ash stabilized crushed-stones

混合料类型	C1	C2	C3	C5
平均温缩系数 ($\mu \epsilon / ^\circ\text{C}$)	8.1	7.6	7.3	7.9

水泥粉煤灰稳定碎石平均温缩系数对比

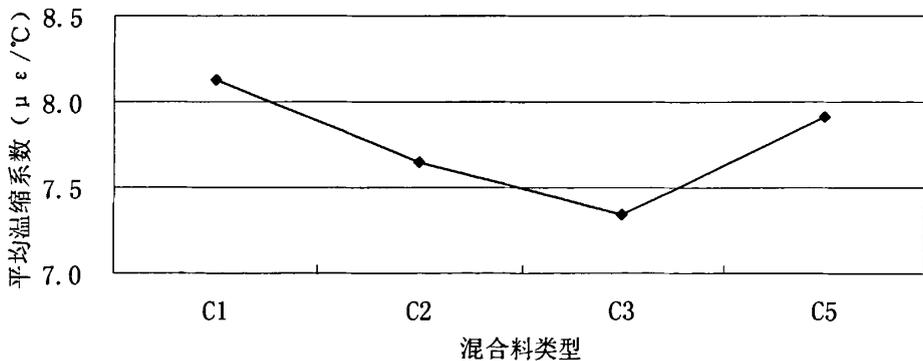


图 4.17 水泥粉煤灰稳定碎石平均温缩系数对比图

Fig 4.17 Comparison of the average temperature shrinkage factor between cement and fly-ash stabilized crushed-stones

由上图可知:

① 水泥粉煤灰稳定碎石的平均温缩系数排序 $C1 > C5 > C2 > C3$, 由 $C1 > C2 > C3$ 可知, 平均温缩系数随着水泥粉煤灰含量的减少而降低。

② 由 C5 的平均温缩系数高于 C2 可知, 水泥含量的增加对水泥粉煤灰稳定碎石的

平均温缩系数的增长有促进作用,且其促进作用大于粉煤灰含量减小而引起混合料平均温缩系数降低的影响。

4.5.3 温缩系数

温缩系数 (β) 是在某一降温区间里,试件单位降温量的温缩应变 ($\times 10^{-6}$)。伴随着温度的升高或降低,混合料的在不同温度区间里的温缩系数也是不断变化的,水泥粉煤灰稳定碎石混合料在 $50^{\circ}\text{C} \sim -20^{\circ}\text{C}$ 温度区间里各区间段的温缩系数如表 4.12 所示:

表 4.12 水泥粉煤灰稳定碎石温缩系数表

Table 4.12 Temperature shrinkage factor of cement and fly-ash stabilized crushed-stones

温度区间 ($^{\circ}\text{C}$)		50~40	40~30	30~20	20~10	10~0	0~-10	-10~-20
温缩系数 ($\mu\epsilon/^{\circ}\text{C}$)	C1	11.9	6.9	8.1	7.7	7	8.7	6.6
	C2	10.5	7.2	7.1	6.8	6.9	7.8	7.2
	C3	10.1	7.1	7.5	6	6.4	8.1	6.2
	C5	12.7	8.4	7.1	7.5	6.5	7.1	6.1

水泥粉煤灰稳定碎石温缩系数

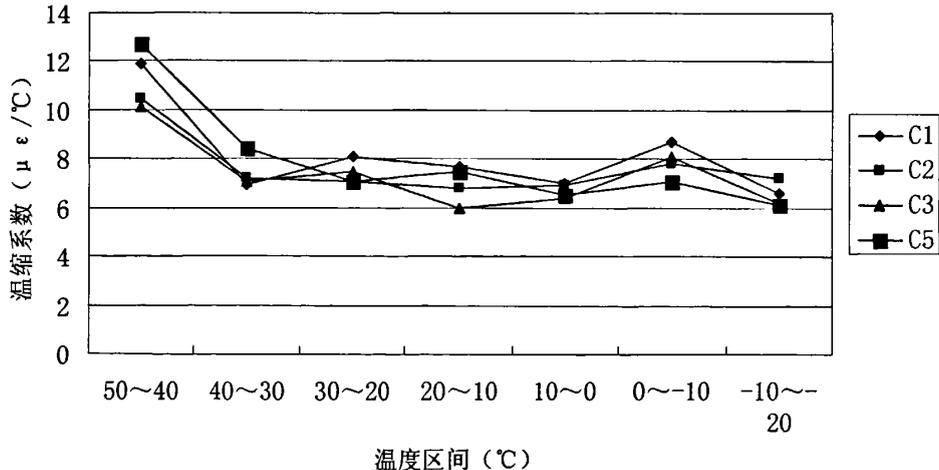


图 4.18 水泥粉煤灰稳定碎石温缩系数对比图

Fig 4.18 Comparison of the temperature shrinkage factor between cement and fly-ash stabilized crushed-stones

由上图可知:

① C1、C2、C3、C5 四种水泥粉煤灰稳定碎石的温缩系数在降温开始时较高, $50^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$ 区间混合料的温缩系数均有所降低, 之后较平稳。

② 在 $0^{\circ}\text{C}\sim-10^{\circ}\text{C}$ 区间里, 四种混合料的温缩系数均有所上升, 混合料毛细孔隙中的水的冰点大部分低于 -10°C , 在 $0\sim-10^{\circ}\text{C}$ 区间里, 毛细管弯液面表面张力增大, 当这种作用力大于毛细管壁颗粒内部的连接力时, 引起温缩系数增加。

③ 在 $-10^{\circ}\text{C}\sim-20^{\circ}\text{C}$ 区间里, 混合料中毛细水结冰, 从而引起温缩系数降低。

4.6 石灰粉煤灰稳定碎石混合料的温缩性能

4.6.1 温缩应变

石灰粉煤灰稳定碎石混合料在 $50^{\circ}\text{C}\sim-20^{\circ}\text{C}$ 温度区间里的温缩应变如表 4.13 所示:

表 4.13 石灰粉煤灰稳定碎石温缩应变表

Table 4.13 Temperature shrinkage strain of lime and fly-ash stabilized crushed-stones

	温度 ($^{\circ}\text{C}$)	50	40	30	20	10	0	-10	-20
温缩应变 ($\mu\epsilon$)	L2	0	167	276	388	481	579	697	792
	L3	0	155	266	347	439	526	633	728
	L4	0	142	235	322	399	465	561	651

石灰粉煤灰稳定碎石温缩应变

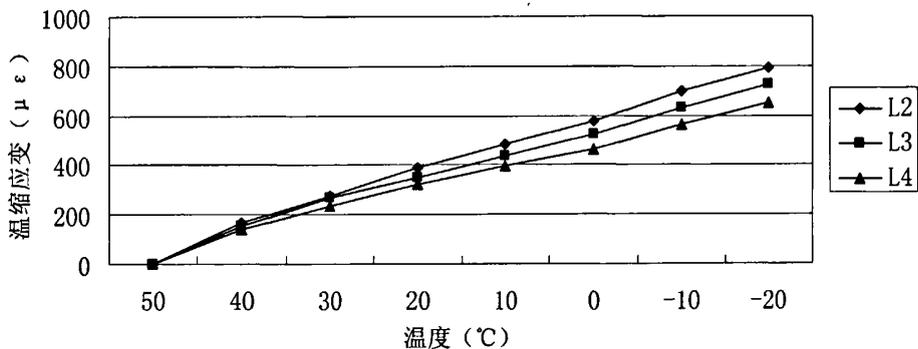


图 4.19 石灰粉煤灰稳定碎石温缩应变对比图

Fig 4.19 Temperature shrinkage strain of lime and fly-ash stabilized crushed-stones

由上图可知:

① 石灰粉煤灰稳定碎石的温缩应变随着温度的降低逐渐增大, 在 -20°C 时达到最大。

② L2、L3、L4 几种石灰粉煤灰稳定碎石的温缩应变在 $40^{\circ}\text{C}\sim-20^{\circ}\text{C}$ 按大小排序均为 $L2>L3>L4$ 。

③ L2 相比 L3 的石灰粉煤灰含量高出 5%, L3 比 L4 高 5%, 温缩应变大小顺序为 $L2>L3>L4$, 可见石灰粉煤灰含量的增加对石灰粉煤灰稳定碎石温缩系数的增加有促进作用。

④ L2、L3、L4 几种水泥粉煤灰稳定碎石在温缩试验时试件温度由 50°C 逐渐降到

-20℃, 在这一温度区间里试件发生了温度收缩, 但此时产生的温度收缩引起的试件长度变化较小, 试验结束时仍未产生任何裂缝。当一定长度的叠加值超过石灰粉煤灰稳定碎石的极限拉应变时, 便产生收缩裂缝。

4.6.2 平均温缩系数

石灰粉煤灰稳定碎石混合料在 50℃~-20℃ 温度区间里的平均温缩系数如表 4.14 所示:

表 4.14 石灰粉煤灰稳定碎石平均温缩系数表

Table 4.14 Average temperature shrinkage factor of lime and fly-ash stabilized crushed-stones

混合料类型	L2	L3	L4
平均温缩系数 ($\mu\epsilon/^\circ\text{C}$)	11.3	10.4	9.3

石灰粉煤灰稳定碎石平均温缩系数对比

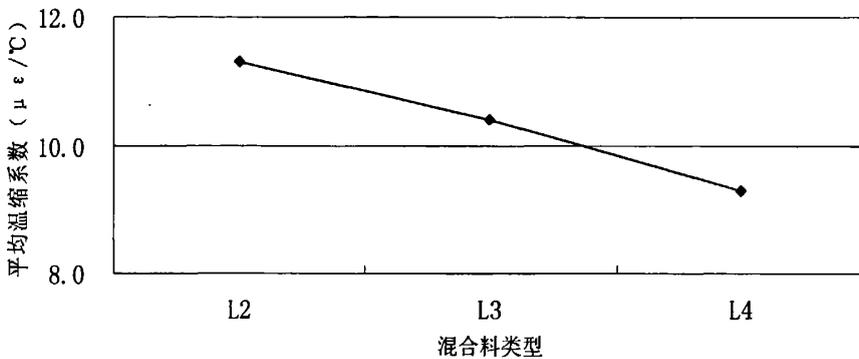


图 4.20 石灰粉煤灰稳定碎石平均温缩系数对比图

4.20 Average temperature shrinkage factor of lime and fly-ash stabilized crushed-stones

由上图可知:

①石灰粉煤灰稳定碎石的平均温缩系数排序 $L2 > L3 > L4$, 平均温缩系数随着石灰粉煤灰含量的减少而降低。

②L2 相比 L3 的石灰粉煤灰含量高出 5%, L3 比 L4 高 5%, 温缩应变大小顺序为 $L2 > L3 > L4$, 可见石灰粉煤灰含量的增加对石灰粉煤灰稳定碎石温缩系数的增加有促进作用。

4.6.3 温缩系数

随着环境温度的不断降低, 石灰粉煤灰稳定碎石混合料的在不同温度区间里的温缩系数也是不断变化的, 在 50℃~-20℃ 温度区间里各区间段的温缩系数如表 4.15 所示:

表 4.15 石灰粉煤灰稳定碎石温缩系数表

Table 4.15 Temperature shrinkage factor of lime and fly-ash stabilized crushed-stones

	温度区间 (°C)	50~40	40~30	30~20	20~10	10~0	0~-10	-10~-20
温缩系数 ($\mu\epsilon/^\circ\text{C}$)	L2	16.7	10.9	11.2	9.3	9.8	11.8	9.5
	L3	15.5	11.1	8.1	9.2	8.7	10.7	9.5
	L4	14.2	9.3	8.7	7.7	6.6	9.6	9

石灰粉煤灰稳定碎石温缩系数

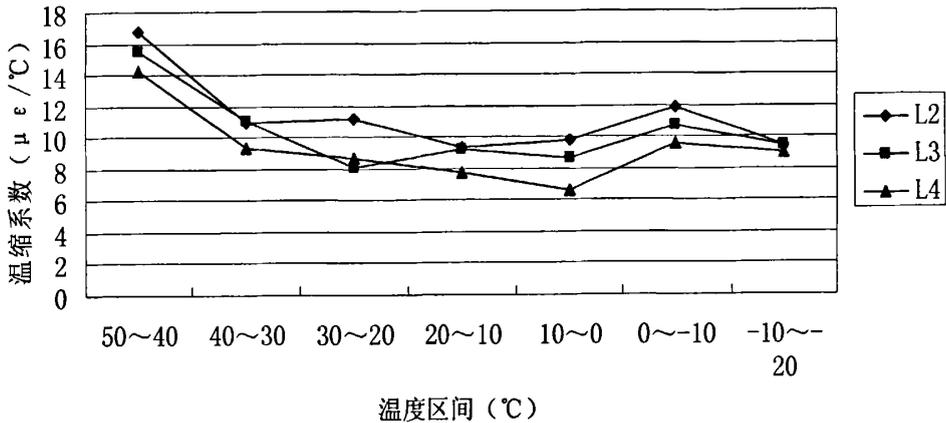


图 4.21 石灰粉煤灰稳定碎石温缩系数对比图

4.21 Temperature shrinkage factor of lime and fly-ash stabilized crushed-stones

由上图可知:

- ① L2、L3、L4 三种石灰粉煤灰稳定碎石的温缩系数在降温开始时较高, 50°C~40°C 区间混合料的温缩系数均有所降低, 之后较平稳。
- ② 在 0°C~-10°C 区间里, 四种混合料的温缩系数均有所上升, 混合料毛细孔隙中的水的冰点大部分低于 -10°C, 在 0~-10°C 区间里, 毛细管弯液面表面张力增大, 当这种作用力大于毛细管壁颗粒内部的连接力时, 引起温缩系数增加。
- ③ 在 -10°C~-20°C 区间里, 混合料中毛细水结冰, 从而引起温缩系数降低。

4.7 水泥粉煤灰稳定碎石与石灰粉煤灰稳定碎石温缩性能对比

水泥粉煤灰稳定碎石 C5 的配合比为水泥: 粉煤灰: 碎石 = 4: 21: 75, 石灰粉煤灰稳定碎石 L2 的配合比为石灰: 粉煤灰: 碎石 = 4: 21: 75。将 C5 与 L2 的温缩应变和温缩系数进行对比, 考察等量水泥替代二灰碎石混合料中的石灰后, 混合料的温缩性能变化。

4.7.1 C5 与 L2 的温缩应变对比

C5 与 L2 两种不同类型混合料在 50℃~-20℃ 温度区间里的温缩应变对比如表 4.16 所示:

表 4.16 C5 与 L2 温缩应变对比表

Table 4.16 Temperature shrinkage strain comparison between C5 and L2

温缩应变 ($\mu\epsilon$)	温度 (°C)	50	40	30	20	10	0	-10	-20
	C5	0	127	211	282	357	422	493	554
	L2	0	167	276	388	481	579	697	792

C5与L2温缩应变对比

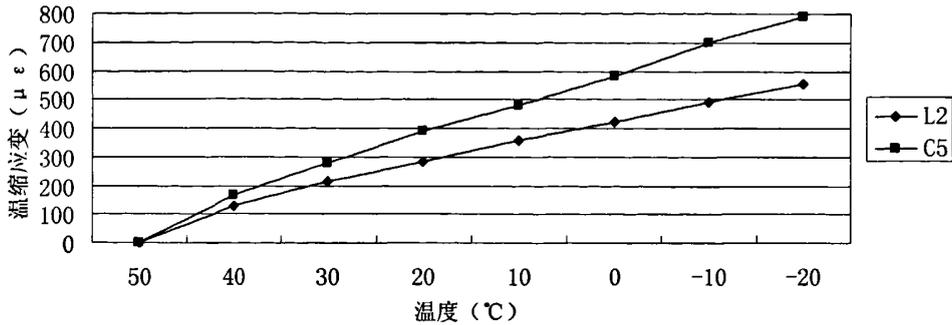


图 4.22 C5 与 L2 温缩应变对比图

Fig 4.22 Temperature shrinkage strain comparison between C5 and L2

由 C5 与 L2 温缩应变对比图可知: 用等量水泥替代石灰后, 混合料的温缩应变有所降低, 且随着环境温度的降低, 温缩应变降低幅度有所增加。可见用水泥替代石灰形成的水泥粉煤灰稳定碎石混合料的温缩应变要优于石灰粉煤灰稳定碎石。

4.7.2 C5 与 L2 的温缩系数对比

C5 与 L2 两种类型混合料在 50℃~-20℃ 的不同温度区间里温缩系数对比如表 4.17 所示:

表 4.17 C5 与 L2 温缩系数对比表

Table 4.17 Temperature shrinkage factor comparison between C5 and L2

温度区间 (°C)	50~40	40~30	30~20	20~10	10~0	0~-10	-10~-20	
温缩系数 ($\mu\epsilon/^\circ\text{C}$)								
	C5	12.7	8.4	7.1	7.5	6.5	7.1	6.1
	L2	16.7	10.9	11.2	9.3	9.8	11.8	9.5

C5与L2温缩系数对比

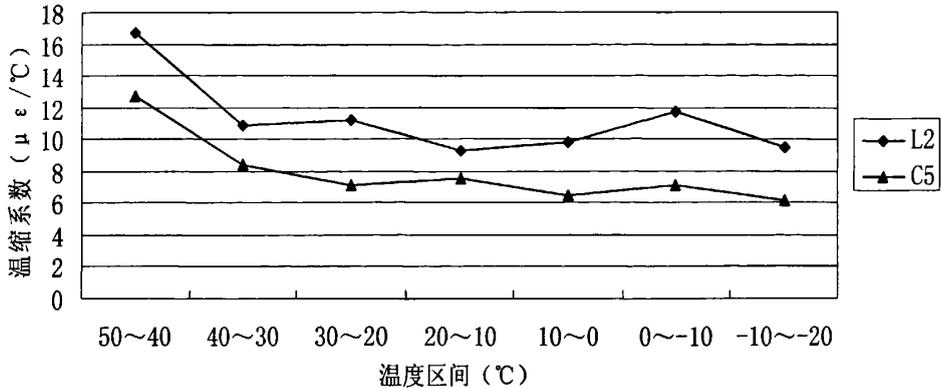


图 4.23 C5 与 L2 温缩系数对比图

Fig 4.23 Temperature shrinkage factor comparison between C5 and L2

由 C5 与 L2 温缩系数对比图可知,用等量水泥替代石灰后,混合料的温缩系数在各个降温区间里均有所降低,混合料 C5 的温缩系数变化规律与 L2 基本一致。可见用水泥替代石灰形成的水泥粉煤灰稳定碎石混合料的温缩系数要优于石灰粉煤灰稳定碎石。

4.8 收缩影响因素分析

水泥(石灰)粉煤灰稳定碎石是由水泥(石灰)、粉煤灰、碎石和水几部分组成,各组成材料自身性质以及相互之间的作用等多方面原因影响着混合料的收缩速度与收缩程度。通过收缩机理研究和试验数据分析,认为影响收缩的因素分为以下几种:碎石含量,碎石级配组成,水泥(石灰)含量、粉煤灰含量、含水量、龄期。

(1) 碎石含量

碎石是混合料中含量最多的部分,它一般要占到材料干重的 80% 左右,它结构致密、性能稳定、强度高,碎石本身的收缩也会影响整体材料的干燥收缩性能。通常,孔隙率大、吸水率高、模量值低的碎石具有较大的干燥收缩率。不过在水泥(石灰)粉煤灰稳定碎石的使用过程中碎石发生收缩的可能性最小,变形量也最小,一般认为它的掺入对水泥(石灰)粉煤灰的收缩起抑制作用,在可能情况下应尽量加大集料在水泥(石灰)粉煤灰稳定碎石中的含量,当然过大的集料含量会增加压实难度,降低混合料强度。^{[34][35][36][37]}

C1、C2、C3 三种黔北电厂粉煤灰的水泥粉煤灰稳定碎石混合料,配合比分别为水泥:粉煤灰:碎石=3:27:70、水泥:粉煤灰:碎石=3:22:75、水泥:粉煤灰:碎石=3:17:80。混合料中碎石含量逐渐增加,平均干缩系数分别为 63、58、55;

平均温缩系数分别为 8.1、7.6、7.3。

L2、L3、L4 三种黔北电厂粉煤灰的石灰粉煤灰稳定碎石混合料，配合比分别为石灰：粉煤灰：碎石=4：21：75、石灰：粉煤灰：碎石=4：16：80、石灰：粉煤灰：碎石=4：11：85。混合料中碎石含量逐渐增加，平均干缩系数分别为 94、87、75；平均温缩系数分别为 8.1、7.6、7.3。

可见碎石含量的增加对黔北电厂粉煤灰的半刚性基层混合料的收缩具有一定程度的抑制作用，在路面基层设计强度可以保证的情况下，应尽量使用碎石含量较高的配合比以降低半刚性基层的收缩。

(2) 碎石级配组成

本文所用碎石级配符合《公路沥青路面设计规范 JTG D50-2006》中规定的骨架密实型石灰粉煤灰稳定碎石的级配范围，级配单一，此处对比他人研究成果来分析碎石级配组成对半刚性基层收缩性能的影响。

长安大学徐江萍在博士论文《水泥粉煤灰稳定碎石基层沥青路面的抗裂性能研究》^[17]中的研究表明，集料级配能形成较好骨架结构的水泥粉煤灰稳定碎石混合料，其干燥收缩量小于未形成骨架结构的水泥粉煤灰稳定碎石混合料。采用逐级填充法得到的骨架密实型水泥粉煤灰稳定碎石混合料的温缩系数要小于其他级配类型混合料的温缩系数。

长安大学杨文丁在硕士论文《半刚性基层材料收缩性能研究》中的研究表明，骨架密实型二灰碎石 GM4：11：85 采用了《公路沥青路面设计规范 JTJ014-97》规定骨架密实型石灰粉煤灰稳定类集料级配范围，其平均干缩系数为 85.4，在 55℃ 到 -15℃ 范围内混合料平均温缩系数为 9.1。本文中石灰粉煤灰稳定碎石 L4（4：11：85）也采用骨架密实型结构，级配符合《公路沥青路面设计规范 JTG D50-2006》中规定的骨架密实型石灰粉煤灰稳定碎石的级配范围，平均干缩系数为 75，在 50℃ 到 -20℃ 范围内混合料的平均温缩系数为 9.3，平均干缩系数和平均温缩系数均与二灰碎石 GM4：11：85 接近。杨文丁论文中的另一种采用悬浮密实型级配的二灰碎石 XM4：11：85，其平均干缩系数为 102.1，平均温缩系数为 10.3。对比 GM、XM、L4 可知，集料采用悬浮密实型时，二灰碎石的平均干缩系数和平均温缩系数均高于集料采用骨架密实型的二灰碎石，即悬浮密实型二灰碎石的收缩性能次于骨架密实型二灰碎石。

可见骨架密实的水泥（石灰）粉煤灰稳定碎石无论是干缩还是温缩性能都要优于悬浮密实的水泥（石灰）粉煤灰稳定碎石。这是因为在骨架密实水泥（石灰）粉煤灰稳定碎石中，集料堆积形成骨架结构，水泥（石灰）粉煤灰结合料填充在集料颗粒间的空隙中，集料骨架结构对空隙中的水泥（石灰）粉煤灰起着有效的抑制作用。但是在悬浮结构的水泥（石灰）粉煤灰稳定碎石中，集料颗粒之间相互分离，

对水泥（石灰）粉煤灰收缩的抑制作用就大大地降低了。^[38]

（3）水泥（石灰）含量

级配集料不具有任何粘结力，粉煤灰也须与水泥一起才能发挥其促使强度增长的作用，集料中掺入足够量的水泥，在其胶结作用下，才能形成强度。普通硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥和火山灰质硅酸盐水泥都可用于水泥粉煤灰稳定碎石。通常情况下，硅酸盐类水泥的稳定效果较好，铝酸盐水泥虽可用于稳定但效果较差。水泥粉煤灰稳定碎石的强度随水泥剂量的增加而增长，不存在最佳水泥剂量。但过多的水泥用量，虽获得强度的增加，经济上却不一定合理，水泥的水化反应耗掉了大量的水分，导致半刚性基层铺筑前期水分过快丧失而引起较大的干燥收缩，出现开裂。^[39]

通过水泥粉煤灰稳定碎石混混合料 C2（3：22：75）和 C5（4：21：75）的干缩对比可知：C2 和 C5 的平均干缩系数分别为 58 和 68，可见随着水泥含量的增加水泥粉煤灰稳定碎石平均干缩系数也增加；C2 和 C5 的平均温缩系数分别为 7.6 和 7.9，可见水泥含量的增加对水泥粉煤灰稳定碎石的平均温缩系数的增长有促进作用，且其促进作用大于粉煤灰含量减小而引起混合料平均温缩系数降低的影响。

在石灰粉煤灰稳定碎石中通常采用经充分消解的熟石灰。当石灰粉煤灰中的石灰含量增加时，就会加大混合料水化过程的碱度，从而易产生高碱度的水化硅酸钙产物，它的干燥收缩量比一般碱度的水化硅酸钙高出 2-3 倍，因此过多的石灰含量会增大二灰碎石的收缩。

在水泥（石灰）粉煤灰稳定碎石强度足够的情况下，应适当减少水泥（石灰）的含量。

（4）粉煤灰含量

由水泥（石灰）粉煤灰稳定碎石混合料的强度形成机理和收缩机理可知：在水泥（石灰）粉煤灰稳定碎石的养生过程中粉煤灰颗粒从边缘逐渐向中心发生水化反应，产生水化产物，由于粉煤灰颗粒的活性相对较低，水化反应进行得比较慢，因水化而发生的化学收缩非常小。在水泥（石灰）粉煤灰稳定碎石中粉煤灰颗粒会起到一种微集料作用，从而抑制水泥（石灰）粉煤灰的收缩。

C1、C2、C3 三种黔北电厂粉煤灰的水泥粉煤灰稳定碎石混合料，配合比分别为水泥：粉煤灰：碎石=3：27：70、水泥：粉煤灰：碎石=3：22：75、水泥：粉煤灰：碎石=3：17：80，混合料中水泥与粉煤灰比例分别为 1：9、1：7、1：6，粉煤灰的相对含量逐渐增加，混合料平均干缩系数分别为 63、58、55；平均温缩系数分别为 8.1、7.6、7.3。

L2、L3、L4 三种黔北电厂粉煤灰的石灰粉煤灰稳定碎石混合料，配合比分别为石灰：粉煤灰：碎石=4：21：75、石灰：粉煤灰：碎石=4：16：80、石灰：粉煤灰：

碎石=4: 11: 85, 混合料中石灰与粉煤灰比例分别为 1: 5、1: 4、1: 3, 粉煤灰的相对含量逐渐增加, 混合料平均干缩系数分别为 94、87、75; 平均温缩系数分别为 8.1、7.6、7.3。

可见粉煤灰相对含量的增加对黔北电厂粉煤灰的半刚性基层混合料的收缩具有一定程度的抑制作用。因此, 粉煤灰不会对水泥(石灰)粉煤灰稳定碎石的开裂产生不利影响。

(5) 含水量

水对水泥(石灰)粉煤灰稳定碎石的生产、施工、养生以及以后的路用性能都起着很关键的作用, 水一方面是水泥(石灰)粉煤灰中水化反应所必须, 另一方面能够润湿材料, 使得混合料在压实过程中达到最大的密实度。在一定的压实条件下, 只有处于最佳含水量, 材料才能被压实到最大干密度, 从而使得材料具有良好的路用性能。但是在生产过程中, 往往在水泥(石灰)粉煤灰稳定碎石中加入过量的水分, 使得拌和容易, 过多的水造成的不良后果是: 一方面施工过程中基层平整度、高程难以控制; 另一方面水泥(石灰)粉煤灰稳定碎石的性能也不能保证。多余水分在水泥(石灰)粉煤灰稳定碎石中形成水囊, 形成大量的毛细孔隙, 增加了材料中的空隙率, 过多水分蒸发后会造成水泥(石灰)粉煤灰稳定碎石的严重收缩开裂, 这是水泥(石灰)粉煤灰稳定碎石早期开裂的最主要因素。因此, 严格控制水泥(石灰)粉煤灰稳定碎石混合料中的含水量对抑制收缩开裂非常重要。

(6) 龄期

半刚性基层的强度和刚度都随着龄期的增长不断增长, 强度的增加对于收缩有着很好的抑制作用, 因而随着龄期的增长半刚性材料的收缩逐渐减小。

总而言之, 在水泥(石灰)粉煤灰稳定碎石中, 集料能够抑制收缩开裂; 粉煤灰不会对材料整体的收缩开裂产生什么不利影响; 未充分消解的石灰颗粒往往引起二灰碎石的后期膨胀开裂, 太大的石灰含量会增加二灰的收缩系数; 过量的水泥将引起早期收缩严重; 过多的水分容易引起水泥(石灰)粉煤灰稳定碎石的早期收缩开裂。在进行基层设计时, 必须严格控制水泥(石灰)粉煤灰稳定碎石混合料中的含水量, 通过调整水泥(石灰)、粉煤灰和水的组成比例, 将水泥(石灰)粉煤灰自身的收缩控制在最低, 在水泥(石灰)粉煤灰稳定碎石中适当增加集料的含量, 降低水泥(石灰)粉煤灰比例, 从而达到减少收缩的目的。

4.9 本章小结

① 采用机械法测量黔北电厂粉煤灰的水泥粉煤灰稳定碎石和石灰粉煤灰稳定碎石的干燥收缩, 计算干缩应变、干缩系数等干缩指标。采用电测法测量水泥粉煤灰稳定碎石和石灰粉煤灰稳定碎石的温度收缩, 计算温缩应变、温缩系数等温缩指

标。

②黔北电厂粉煤灰的水泥粉煤灰稳定碎石和石灰粉煤灰稳定碎石的干燥收缩应变均随着时间推移和失水率的增加而逐渐增长,其增长速度逐渐变缓;温缩应变也随着环境温度的降低逐渐增长。

③黔北电厂粉煤灰的水泥粉煤灰稳定碎石和石灰粉煤灰稳定碎石的 28 天干燥收缩应变与混合料的平均干缩系数大小规律一致, $50^{\circ}\text{C}\sim-20^{\circ}\text{C}$ 温缩应变与平均温缩系数的大小规律一致。

④在水泥含量相同时,水泥粉煤灰稳定碎石的平均干缩系数随着水泥粉煤灰含量的减少而降低, $\text{C1}(63) > \text{C2}(58) > \text{C3}(55)$;水泥粉煤灰含量相同时,水泥含量的增加对水泥粉煤灰稳定碎石平均干缩系数的增加有着显著的影响, $\text{C5}(68) > \text{C2}(63)$ 。石灰粉煤灰稳定碎石的平均干缩系数随着石灰粉煤灰含量的增加而减小, $\text{L2}(94) > \text{L3}(87) > \text{L4}(75)$ 。

⑤在水泥含量相同时,水泥粉煤灰稳定碎石的平均温缩系数随着水泥粉煤灰含量的减少而降低, $\text{C1}(8.1) > \text{C2}(7.6) > \text{C3}(7.3)$;水泥粉煤灰含量相同时,水泥含量的增加对水泥粉煤灰稳定碎石平均温缩系数的增加有着显著的影响, $\text{C5}(7.9) > \text{C2}(7.2)$ 。石灰粉煤灰稳定碎石的平均温缩系数随着石灰粉煤灰含量的增加而减小, $\text{L2}(11.3) > \text{L3}(10.4) > \text{L4}(9.3)$ 。

⑥水泥粉煤灰稳定碎石中,水泥含量的增加对于干缩应变、平均干缩系数以及温缩应变、平均温缩系数的影响要远高于粉煤灰含量减小的影响。

⑦水泥等量替代石灰粉煤灰稳定碎石 L2 中的石灰后形成水泥粉煤灰稳定碎石 C5,其干缩系数、温缩系数、28 天干缩应变、 $50^{\circ}\text{C}\sim-20^{\circ}\text{C}$ 温缩应变的变化规律基本一致,但数值均远低于石灰粉煤灰稳定碎石,可见水泥替代石灰可有效改善石灰粉煤灰稳定碎石的收缩性能。

⑧黔北电厂粉煤灰的水泥粉煤灰稳定碎石和石灰粉煤灰稳定碎石,具有良好的干燥收缩和温度收缩性能,且水泥粉煤灰稳定碎石的干缩和温缩性能均优于石灰粉煤灰稳定碎石,在较宽的水温条件范围里可用于半刚性基层的修筑。

第五章 结论与展望

5.1 结论

本文主要针对黔北电厂粉煤灰用作路面半刚性基层材料时的路用性能进行研究。通过室内试验和理论分析,分析了黔北电厂粉煤灰的物理化学性质,系统研究了黔北电厂粉煤灰的水泥粉煤灰稳定碎石和石灰粉煤灰稳定碎石的力学性能、水稳定性和抗冻性能、收缩性能等几种主要的路用性能,全面分析了黔北电厂粉煤灰的水泥粉煤灰稳定碎石和石灰粉煤灰稳定碎石的强度形成机理、收缩机理、强度形成的影响因素和收缩的影响因素,为黔北电厂粉煤灰用作路面基层材料提供试验数据参考。

研究得到了以下主要结论:

(1) 黔北电厂粉煤灰具有较好的物理化学性质,完全符合《公路路面基层施工技术规范 JTJ034-2000》对基层用粉煤灰的技术性能要求,可用作半刚性基层材料。

(2) 黔北电厂粉煤灰的水泥粉煤灰稳定碎石混合料的 7d 无侧限抗压强度范围为 3.5~4.8MPa,略高于《公路沥青路面设计规范 JTG D50-2006》中特重、重、中交通对水泥粉煤灰稳定碎石强度的要求,可见黔北电厂粉煤灰的水泥粉煤灰稳定碎石基层强度可满足各类交通需要,可用于修建各等级公路基层。

(3) 黔北电厂粉煤灰的石灰粉煤灰稳定碎石混合料的 7d 无侧限抗压强度范围为 0.5~1.0MPa。其中 L1 (4:26:70) 的强度为 0.5MPa,仅符合《公路沥青路面设计规范 JTG D50-2006》中轻交通石灰粉煤灰稳定类材料底基层的抗压强度要求,适用范围很小;L2 (4:21:75) 的无侧限抗压强度为 0.7MPa,符合规范中特重、重、中交通底基层和轻交通基层、底基层强度要求;L3 (4:16:80) 和 L4 (4:11:85) 的无侧限抗压强度均高于 0.8MPa,符合各类交通的石灰粉煤灰稳定类材料基层和底基层强度要求。可见黔北电厂粉煤灰的石灰粉煤灰稳定碎石适用范围相对狭窄,在进行基层配合比设计时,应检验设计混合料的无侧限抗压强度以适应交通量要求。

(4) 用水泥替代石灰后,黔北电厂粉煤灰的水泥粉煤灰稳定碎石混合料的早期无侧限抗压强度比石灰粉煤灰稳定碎石混合料要高的多,这对于及早进行面层的摊铺是有利的。但用水泥替代石灰后混合料抗压回弹模量增高,刚度较大,脆性较高。

(5) 水泥粉煤灰稳定碎石和石灰粉煤灰稳定碎石的无侧限抗压强度、劈裂强度、抗压回弹模量的增长规律基本一致。水泥含量的增加对于水泥稳定碎石混合料的抗压强度、劈裂强度、抗压回弹模量的增长有显著影响。

(6) 使水泥(石灰)粉煤灰稳定碎石混合料抗压强度最高的碎石比例范围是 75

%~85%，使其劈裂强度最高的粒料比例是80%左右。综合碎石比例对抗压强度和劈裂强度的影响，以及实际使用中碎石的比例经验，水泥(石灰)粉煤灰混合料的粒料最佳比例范围是75%~85%，最佳值是80%，水泥粉煤灰的最佳比例为C:F=1:7~1:5，石灰粉煤灰的最佳比例为L:F=1:5~1:3。这样既能既保证混合料有足够抗压强度，又使混合料具有良好的抗拉强度，减少破坏。

(7) 水泥粉煤灰稳定碎石混合料强度的主要影响因素为集料成分、集料级配组成、水泥品种及剂量、粉煤灰质量与计量、施工及养生。石灰粉煤灰稳定碎石混合料强度的主要影响因素为集料质量、集料级配组成、石灰质量与剂量、含水量、拌和及压实、养生条件及龄期。

(8) 黔北电厂粉煤灰的水泥粉煤灰稳定碎石和石灰粉煤灰稳定碎石均具有较好的水稳定性和抗冻性能，水稳系数和抗冻系数均高于70%。水泥粉煤灰稳定碎石的水稳系数和抗冻系数一般高于80%，石灰粉煤灰稳定碎石的水稳系数和抗冻系数稍低于水泥粉煤灰稳定碎石。表明水泥粉煤灰稳定碎石的水稳定性和抗冻性能均优于石灰粉煤灰稳定碎石。我国自然气候条件区域差异显著，各地区水温状况相差较大的情况下，黔北电厂粉煤灰的水泥粉煤灰稳定碎石和石灰粉煤灰稳定碎石半刚性基层具有广阔的应用前景。

(10) 在水泥含量相同时，水泥粉煤灰稳定碎石的平均干缩系数随着水泥粉煤灰含量的减少而降低，C1(63) > C2(58) > C3(55)；水泥粉煤灰含量相同时，水泥含量的增加对水泥粉煤灰稳定碎石平均干缩系数的增加有着显著的影响，C5(68) > C2(63)。石灰粉煤灰稳定碎石的平均干缩系数随着石灰粉煤灰含量的增加而减小，L2(94) > L3(87) > L4(75)。

(11) 在水泥含量相同时，水泥粉煤灰稳定碎石的平均温缩系数随着水泥粉煤灰含量的减少而降低，C1(8.1) > C2(7.6) > C3(7.3)；水泥粉煤灰含量相同时，水泥含量的增加对水泥粉煤灰稳定碎石平均温缩系数的增加有着显著的影响，C5(7.9) > C2(7.2)。石灰粉煤灰稳定碎石的平均温缩系数随着石灰粉煤灰含量的增加而减小，L2(11.3) > L3(10.4) > L4(9.3)。

(12) 水泥等量替代石灰粉煤灰稳定碎石L2中的石灰后形成水泥粉煤灰稳定碎石C5，其干缩系数、温缩系数、28天干缩应变、50℃~-20℃温缩应变的变化规律基本一致，但数值均远低于石灰粉煤灰稳定碎石，水泥替代石灰可有效改善石灰粉煤灰稳定碎石的收缩性能。

(13) 影响黔北电厂粉煤灰的水泥(石灰)粉煤灰稳定碎石干燥收缩和温度收缩的主要因素为：碎石含量、碎石级配组成、水泥(石灰)含量、粉煤灰含量、含水量、龄期。

(14) 黔北电厂粉煤灰的水泥粉煤灰稳定碎石和石灰粉煤灰稳定碎石，具有良好

的干燥收缩和温度收缩性能，且水泥粉煤灰稳定碎石的干缩和温缩性能均优于石灰粉煤灰稳定碎石，在较宽的水温条件范围里可用于半刚性基层的修筑。

5.2 展望

石灰粉煤灰稳定碎石基层已广泛应用许多年，水泥粉煤灰稳定碎石基层在实际工程中使用较少，还须进行更全面的深入研究。鉴于本人水平有限和研究生期间时间短暂，加之试验条件所限，本文只进行了少量配合比的低结合料水泥粉煤灰稳定碎石和石灰粉煤灰稳定碎石的配合比设计及相应的路用性能检验，尚有许多如下工作有待进一步完成：

- (1) 采用更多类型的不同水泥掺量和石灰掺量的配合比，并对不同配合比混合料的各项性能进行对比，更全面地评价黔北电厂粉煤灰用作路面基层的路用性能。
- (2) 对配合比混合料的无侧限抗压强度、劈裂强度、抗压回弹模量等性能进行长期测定，以检验混合料的长期路用性能。
- (3) 进行混合料的冲刷和疲劳试验，完善路用性能评价指标。
- (4) 通过实体工程检验黔北电厂粉煤灰的半刚性基层的实际应用效果，为黔北电厂粉煤灰用于路面基层的设计、施工、质量控制等提供更好指导。

致 谢

本文是在尊敬的导师杨锡武教授的悉心指导和热心关怀下完成的。从师以来，杨老师高尚的人品、渊博的学识、深邃的思想、深刻独到的见解、严谨的治学态度和坦荡的胸襟给我留下了深刻的印象，使我终身受益。我愿借此机会向老师表示衷心的感谢！

在论文完成过程中得到了道路试验室的杨大田老师的悉心指导和帮助，与他的交流使我开拓了视野，拓展了研究思路，在此表示真诚的感谢！

三年来，同门熊锐、杨小丽、刘克、李鑫及其他师兄弟在试验和论文中给予笔者大量的帮助和支持，室友杨发、徐松给本人创造了一个良好的学习、生活环境，在此表示诚挚的感谢！

更要感谢父母和亲人们对本人学业的鼎力支持，他们的关怀是我前进的动力和面对困难的勇气。没有他们的支持和后盾，本人无法顺利完成学业。

最后，向两年多来许多给予我关心和帮助的朋友们、同学们表示衷心的感谢！衷心感谢评阅论文和参加本人答辩的各位专家、教授！

参考文献

- [1] [美]詹姆斯 F·迈耶斯, 拉曼 匹丘曼尼, 伯纳德特 S·卡普尔斯. 交通部公路科学研究所材料研究室. 粉煤灰——一种公路建筑材料[M]. 人民交通出版社. 1982. 10.
- [2] 梁乃兴, 申爱琴. 工程材料[M]. 人民交通出版社. 1999. 11.
- [3] 吕梁, 侯浩波. 粉煤灰性能与利用[M]. 中国电力出版社. 1998. 1-53.
- [4] 韩怀强. 粉煤灰利用技术[M]. 化学工业出版社. 2001.
- [5] 沈旦申. 我国粉煤灰利用科学技术的可持续发展[J]. 建筑材料学报. 1998, (1)2:170-174.
- [6] JieZhang, Ruben Solis. Fly-Ash-Stabilized Gypsiferous Soil as an Embankment Material[M]. Springer Berlin Heidelberg. 2008.
- [7] 张覃, 毛德明等. 粉煤灰的矿物学特性研究[J]. 粉煤灰综合利用. 2001, 1:11-14.
- [8] 左文生, 叶连生. 粉煤灰资源化利用发展战略的研究[J]. 粉煤灰综合利用. 1992, 2:1-6.
- [9] 最新粉煤灰综合利用新技术与质量技术标准规范使用手册[M]. 北方工业出版社. 2006.
- [10] 王春齐. 水泥粉煤灰稳定碎石基层在枣庄世纪大道工程中的应用[J]. 安徽建筑. 2001, (8)6:66-67.
- [11] 彭旭. 水泥粉煤灰稳定碎石基层施工配合比的调整[J]. 勘察科学技术. 2004, 6:43-44.
- [12] 萧庚. 水泥粉煤灰级配碎石基层混合料微观机理研究[J]. 重庆交通学院学报. 2002, (21)2: 49—53.
- [13] 萧庚. 水泥粉煤灰级配碎石基层混合料的路用性能研究[J]. 重庆交通学院学报. 2001, 20(增刊):61—65.
- [14] 杨锡武, 梁富权. 水泥(石灰)粉煤灰碎石混合料半刚性路面基层设计参数研究[J]. 中国公路学报. 1996, (9)3:43—46.
- [15] 杨锡武. 半刚性路面基层材料收缩规律的研究[J]. 华东公路. 1994, 3:74-76.
- [16] 张嘎吱. 水泥粉煤灰稳定碎石基层配合比设计和路用性能研究[D]. 西安:长安大学, 2004
- [17] 徐江萍. 水泥粉煤灰稳定碎石基层沥青路面抗裂性能研究[D]. 西安:长安大学, 2006.
- [18] 中华人民共和国行业标准. 沥青路面设计规范(JTGD50-2006). 中华人民共和国交通部. 2006.
- [19] 中华人民共和国行业标准. 公路路面基层施工技术规范(JTJ034-2000). 中华人民共和国交通部. 2000. 10.
- [20] 徐培华, 王安玲. 公路工程混合料配合比设计与试验技术手册[M]. 人民交通出版社. 2001. 8.
- [21] 李亚杰. 建筑材料[M]. 中国水利水电出版社. 2001. 4.
- [22] 林绣贤. 半刚性基层沥青路面[M]. 人民交通出版社. 1991. 11.
- [23] 中华人民共和国行业标准. 公路路面基层施工技术规范(JTJ 034-93). 中华人民共和国交通部. 1993.
- [24] 中华人民共和国行业标准. 公路土工试验规程(JTJ051-1993). 中华人民共和国交通部. 1993.
- [25] 杨锡武. 水泥(石灰)粉煤灰混合料路面基层研究[J]. 重庆交通学院学报. 1997, (16)2:48-52.
- [26] 陈潇. 水泥粉煤灰稳定碎石路面基层材料的设计与研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2006.
- [27] 刘红瑛. 骨架密实型二灰稳定碎石基层配合比设计方法及路用性能研究[D]. 西安:长安

- 大学, 2001.
- [28] 吕兰明. 沥青路面半刚性基层材料的路用性能研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2006.
- [29] 杨文丁. 半刚性基层材料收缩性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2004.
- [30] 沙庆林. 高等级公路半刚性基层沥青路面[M]. 人民交通出版社. 1998. 9.
- [31] 楼海洋. 半刚性基层路面[M]. 人民交通出版社. 1991.
- [32] Rigo J. M., Degeimbre R. and Franc ken L.. Reflectiver Cracking Pavement. Published by E & FN Spon, London SEI 8IIN 0419 182209, Rilem 1993.
- [33] 何兆益, 杨锡武. 路基路面工程[M]. 人民交通出版社. 2006. 8.
- [34] Lostu S. S. Y. Retardation of Reflectiver Cracking in Asphalt Concrete Overlays by Use of Geogrid Interlays. M. S. Disseration. Tongji University, 1995.
- [35] 沙爱民. 半刚性路面材料结构与性能[M]. 人民交通出版社. 1998. 4.
- [36] Kannika Pahonepipat and Chartchai Hengvanich. A Study on Autogereous Shrinkage of Cement Paste with Classified Fly Ash. Research report Senior projects, Vol. 3. 1996.
- [37] 吴赣昌, 凌天清. 半刚性基层温缩裂缝的扩展机理分析[J]. 中国公路学报. 1998, (11)1:21-28.
- [38] 岳卫民. 水泥粉煤灰稳定碎石配合比设计方法及路用性能研究[D].
- [39] 徐江萍, 徐晓刚, 刘国清. 水泥粉煤灰稳定碎石基层性能研究[J]. 中外公路. 2005, (25)3:15-18.
- [40] 朱云升, 郭忠印等. 半刚性基层材料干缩和温缩特性试验研究[J]. 公路 2006. 2:145-147.
- [41] 李云雁, 胡传荣. 试验设计与数据处理[M]. 化学工业出版社. 2005. 3.
- [42] 陈魁. 试验设计与分析[M]. 清华大学出版社. 1996. 8.
- [43] 李宇峙, 邵腊庚. 路基路面工程检测技术[M]. 人民交通出版社. 2003. 2.
- [44] Mari Paz Lorenzo, Sara Goni. ect. Journal of the American Ceramic Society: Activation of Pozzolanic Reaction of Hydrated Portland Cement Fly Ash Pastes in Sulfate Solution, Vol. 85. NO. 12. Dec. 2002.
- [45] [英]R. K. 德海尔. 陈义初. 粉煤灰的试验研究及其工程应用[M]. 人民交通出版社. 1992. 1.
- [46] 沈丹申, 冒镇恶. 粉煤灰优质混凝土[M]. 上海科学技术出版社. 1992. 11.
- [47] M. A. Castell, A. R. Ingraffen and L. H. Iruin Fatigue Crack Growth in Pavements Journal of Transportation Engineering 2000, July/August.
- [48] 张嘎吱, 沙爱民. 水泥粉煤灰稳定碎石基层的龄期和强度[J]. 公路交通科技. 2005, (22) 6:27-29.
- [49] Adrian Ricardo Arcill and Samer Madant Development of A Pavement Rutting Model From Experiment Data Journal of Transportation Engineering 2000, July/August.
- [50] 张嘎吱, 沙爱民. 水泥粉煤灰稳定碎石基层材料的级配范围[J]. 长安大学学报(自然科学版). 2003, (23)4:1-5.
- [51] 李立寒, 张南鹭. 道路建筑材料[M]. 人民交通出版社. 2004. 3.

在学期期间发表的论著及取得的科研成果

在学期期间发表的论著:

- [1] 涂帅, 杨锡武, 熊锐, 杨小丽, 杨发. 灰色系统理论在半刚性基层干缩预测中的应用[J]. 公路与汽运, 2008, (6).
- [2] 熊锐, 杨锡武, 杨发, 涂帅, 杨小丽. 纤维沥青混合料高温稳定性影响因素的灰关联熵分析[J]. 重庆交通大学学报, 2008, (5).
- [3] 杨小丽, 杨锡武, 熊锐, 涂帅. 沥青路面结构计算分析[J]. 中外公路, 2009, (5).
- [4] 杨发, 刘大超, 涂帅, 赖增成, 熊锐. SEAM 沥青混合料高温稳定性影响因素的灰关联熵分析[J]. 石油沥青, 2008, (6).

在学期期间参与的科研项目:

- [1] 黔北电厂粉煤灰在半刚性基层中的应用研究
- [2] 农村公路路面结构及材料铺筑技术综合研究, 重庆市交委科研项目