

2014 浙江省公路学会

学术论文集

Zhejiangsheng Gonglu Xuehui Xueshu Lunwenji

浙江省公路学会 编



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

2014 浙江省公路学会学术论文集

浙江省公路学会 编



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

图书在版编目(CIP)数据

2014 浙江省公路学会学术论文集 / 浙江省公路学会
编. — 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015. 3

ISBN 978-7-114-12116-6

I. ①2… II. ①浙… III. ①道路工程—文集 IV.
①U41-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 052494 号

书 名: 2014 浙江省公路学会学术论文集

著 作 者: 浙江省公路学会

责任编辑: 赵瑞琴

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpress.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京市密东印刷有限公司

开 本: 880×1230 1/16

印 张: 17.5

字 数: 470 千

版 次: 2015 年 3 月 第 1 版

印 次: 2015 年 3 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-12116-6

定 价: 70.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

《2014 浙江省公路学会学术论文集》

编 委 会

郭剑彪 徐纪平 李良福 王德宝

任 忠 洪秀敏 张治中 卞钧霁

编 委

唐锡军 邵 宏 邵银泉 韩海航 钱立高

叶卫军 孙校伟 寿 华 朱汉华 楼晓寅

吴安宁 文 斌 程 涛 吴德兴 杨 健

金仲秋 金小平 范建军 劳可军 蒋理江

张文华 章剑谷 房石磊 邱建中 范家明

黄继满 叶沙平 余本年 汪银华 李志胜

汪会邦 单光炎 韩联农

目 录

沥青路面快速冷再生技术研究	王永兵 王 洪(1)
混凝土路面白改黑多锤头破碎技术的运用	潘万春(13)
高强度、低松弛无黏结预应力锚索在高边坡加固中的施工要点	邓广新 王文武 王松海(18)
高速公路软基处理发展趋势及热点问题探讨	刘慈军 张桂荣 何 宁 陈 涛 周玉娟(22)
公路路基钢管桩基混凝土防撞护栏的设计与施工	金 尧 鲁智君 王 炜 陈宏伟 杨吉春 任炯范 牟 振(34)
关于公路路面大中修工程设计的探讨	吕建伟(39)
关于公路养护质量评价机制及效用性的思考	陈小华 何富军(42)
泡沫混凝土在公路工程的应用	徐 俊(48)
泡沫混凝土在浙东某高速公路爬坡车道工程中的应用	赵文刚 陈国瑞(52)
泡沫沥青厂拌冷再生施工工艺在衢州国道大修工程中的应用体会	曾明明 王文武 邓广新(55)
浅谈泡沫沥青冷再生基层的施工质量控制	徐发生 徐有成 薛惠斌(60)
浅析高速公路易崩解类岩路基填筑(试验段)质量控制	夏剑峰(66)
衢州市石梁至华墅公路水泥稳定碎石基层振动成型法的特点分析	苏道双 邓广新 王松海(70)
水泥混凝土路面灾害起因与处治	李春香 张 盛(73)
浙北地区沥青路面早期病害调查分析与对策	沈火林(77)
大跨径钢管混凝土拱桥吊杆更换力学分析	李 威 应 伟(98)
独柱墩单支连续梁桥抗倾覆稳定计算与加固	方建平 陈凌云 胡成琛(105)
高黏 SMA-5 性能及其在桃夭门大桥桥面养护中的应用	蒋 达(109)
超大跨悬索桥抗震性能分析	刘 杰 秘相敏(116)
某宽幅空心板桥上部结构病害的诊断及处治	孙文智 肖质江(122)
浅谈预应力混凝土连续箱梁桥加固措施	孙文智 李海光 梁 冰(127)
桥梁一线养护人员日常检查方法及重点检查内容	梁 冰(132)
横向体外预应力技术在装配式空心板桥梁加固中的应用探讨	应 伟(138)
特殊桥梁养护管理模式探讨	袁国清(146)
运营桥梁独柱墩加固工程支座安装施工技术	易明伟(152)
人工平移法安装 55m 大吨位钢箱梁施工技术探讨	梅 芳 翁国强(157)
RFID 射频技术在公路长隧道安全智能管理中的应用	吴 明 傅菁俊 沈叶飞(162)
钱江隧道单台盾构立体化施工技术探索	柳崇敏(164)
浅谈安装智能化公路隧道照明节能控制系统的必要性	潘碧影 王长华(168)

隧道蓄能自发光应急逃生系统研究	梁 冰 吕宁生 项 斌(170)
道路隧道照明改造的低碳、绿色、可持续发展的思路与对策	严国俊 李庆华 黄大康 戚 戎(177)
PLC 液压整体同步控制技术在工程建设中的应用	汤科军 陈爱娣(182)
采用表层种植土的公路绿地施工方法研究	吕 芳 徐叶斐 陈凌云(186)
城郊地区公路项目桥梁护栏设计的探讨	周焕星(191)
击实次数对乳化沥青冷再生混合料性能的影响研究	金国华(197)
机制砂 C35 水下大流动性混凝土配制技术研究	占 文 秦明强 徐文冰(201)
机制砂在桥梁工程中的应用与发展	刘慈军 周玉娟 占 文 秦明强(206)
计算机控制后张法预应力张拉技术的试验研究	毛云龙 曾发强 杨 超 季文洪(211)
后张法宽幅空心板板底纵向裂缝成因分析	胡建明 王润建 董水英 孙文智(216)
普通国省道五型公路科学示范项目研究	华 历(220)
浅谈岩溶地区桩基的“人工造壁”成孔技术	胡建林 李 炜(224)
浅谈公路设计后续服务	张 蕙 樊永冬(227)
浅谈生态交通建设湖州之实践	房石磊(231)
如何做好兼顾城市道路功能的交通工程品质	张杭华(235)
软硬沥青复配温拌沥青混合料的应用与研究	李会龙 朱建军 张永平(240)
省级“智慧公路”信息系统业务需求分析和框架设计	戴红良(245)
稳定型橡胶改性沥青 DSRA 路用性能和应用研究	吴明军 张凡峰(250)
硬质沥青富油混合料的性能研究	沈宏辉 潘 芳(254)
浙江省公路交通情况调查数据处理方法研究	高介敦 张 平(258)
嘉兴市高速公路绿化造林碳汇计量	李 梦 施拥军 周国模 周大勇 张 娇 张英海(262)
嘉善县农村公路大修养护新技术应用研究	符兆峰 陈晓栋 徐寅善(269)

沥青路面快速冷再生技术研究

王永兵 王 洪

(衢州市交通设计有限公司)

摘 要 通过对早强型路面技术方法的选择,采用不同的早强剂剂量对比试验,选出早强效果较好的早强剂和早强效果最好的早强剂用量,同时通过室内试验系统研究早强型冷再生混合料的力学性能、抗冲刷性和抗收缩性,以此来评价早强型冷再生混合料路用性能。早强剂不能对后期强度起到增大的作用,有时反而会略微降低后期强度,因此早强剂对后期抗压回弹模量和劈裂强度的影响可忽略不计。因此早强型水泥稳定冷再生材料结构设计参数可按照无早强剂结构设计参数取值。

关键词 道路工程 沥青路面 快速 冷再生 早强型路面

随着国民经济的发展,公路在国民经济中的重要地位已凸显,随着人们对公路交通安全、舒适性要求的逐步提高,对公路养护、管理工作也提出了更高要求,而如何在公路路面大中修工程施工中逐步提高技术水平,确保维修质量,缩短维修时间,减少维修给正常交通带来的较大影响已成为目前阶段主要需解决的问题。因此在大中修工程施工前首先应通盘考虑维修过程会给交通带来的影响,在进行维修前应对公路使用状况及存在问题仔细研究,制订出科学合理的组织方案,而公众对快速维修的需求使得早强型路面维修技术逐渐得到重视。

1 早强型路面技术方法分类与选择

目前各国拌制早强混凝土技术途径各不相同,综合起来可以分为以下三种:

- (1)利用快硬早强型特种水泥;
- (2)使用早强剂及多种外加剂;
- (3)掺加特种矿物掺合料。

第一种途径在美国被广泛采用,配制快硬混凝土用得最多的技术路线也是采用特种水泥(如:快硬硅酸盐水泥、高铝水泥和硫铝酸盐水泥等)。这种水泥强度形成较快,3d 就可以达到混凝土设计强度。但由于特种水泥凝结时间很快,施工难度较大或要求高,且快硬类特种水泥易风化、保管时间短,所以其生产厂家也相对较少,难于购买而影响其推广应用。

第二种途径关键是要优选早强效果较好的外加剂。目前,较常见的早强剂有可溶性无机盐、可溶性有机化合物、其他固体物质及复合型四类。可溶性无机盐主要是氯化钙、硫酸盐等;可溶性有机化合物主要是三乙醇胺、甲酸钙及醋酸钙等。为获得更好的技术经济效果,可采用复合早强剂,需在实际工程中反复试验验证,确定较理想的构成,才能采用。复合型外加剂具有较广阔的发展前景。

第三种途径的矿物掺合料最初是为节省水泥、减少水化热而被采用的。如今矿物掺合料已成为混凝土的一部分,可以改善混凝土拌和物的工作性能,及硬化后混凝土的微结构和其他性能。早强型矿物掺合料在日本相当流行,国内也有许多单位致力于矿物掺合料的研究并取得一定成效,例如江苏省建筑科学研究院研制的 JK 系列混凝土快速修补剂,在某些方面已取得了进展。由于目前国内对早强型矿物掺合料的研究还不够成熟,又考虑到节约水泥,降低造价,提出选用第二种配制途径——掺加早强剂来配制快通混凝土,并对快通混凝土各龄期强度影响因素进行分析研究,最终确定各因素对快通混凝土强度的

影响程度,确定快通混凝土的最佳因素配合比,指导施工实践。

综合旧路面特点、稳定剂成本、再生材料性能、当地施工技术水平和材料供应情况等方面因素,选用添加早强剂的方法来提高路面早期强度。

1.1 早强剂的品种

早强剂主要有以下几类。

(1) 强电解质无机盐类:硫酸盐、硫酸复盐、硝酸盐、亚硝酸盐、碳酸盐、硅酸盐、氯盐等。其中,氯盐亚硝酸盐有剧毒,使用得较少。

(2) 水溶性有机物:三乙醇胺、尿素、甲酸盐、乙酸盐、丙酸盐等。三乙醇胺、尿素等易挥发损失。

(3) 其他:有机化学成分、无机盐复合物等。

采用上述各类早强剂与普通减水剂、高效减水剂,可以复配制得早强型减水剂和早强型高效减水剂。

1.2 早强剂应用范围

1.2.1 早强剂、早强型减水剂和早强型高效减水剂适用于公路工程需要快速形成强度的快通水泥混凝土结构,蒸养水泥混凝土构件,最低温度不低于 -5°C 的低温环境中施工的有早强要求的水泥混凝土、钢筋混凝土及需要提前张拉和放张的预应力混凝土结构和构件。炎热环境条件下不宜使用早强型外加剂。

1.2.2 掺入水泥混凝土后对人体产生危害或对环境产生污染的化学物质严禁用作早强剂。含有六价铬盐、亚硝酸盐、硫氰酸盐等有害成分的早强剂严禁用于饮水工程及与食物相接触的工程。为了防止有害气体危害人体健康,铵盐、硝铵类或尿素等遇碱释出氨气或易挥发有害气体的早强剂严禁用于办公、居住、洞室等密闭工程。

1.2.3 氯盐类早强剂及与氯盐复配的早强型减水剂和早强型高效减水剂严禁用于下列公路工程水泥混凝土结构:

- (1) 预应力钢筋混凝土结构和构件(防止钢筋腐蚀);
- (2) 相对湿度大于80%环境中使用的露天、水淋、水冲刷、水位变动区的钢筋混凝土结构和构件,暴露在海浪飞溅区和水位变动区、处于海风环境范围内的钢筋混凝土结构和构件;
- (3) 大体积水泥混凝土和钢筋混凝土结构;
- (4) 直接接触酸、碱或其他腐蚀性介质的混凝土和钢筋混凝土结构;
- (5) 经常处在使用温度达 60°C 以上的水泥混凝土和钢筋混凝土结构,以及需经蒸养的钢筋混凝土预制构件(防止钢筋加速锈蚀);
- (6) 表面有装饰(含金属装饰)要求或要求色彩一致的水泥混凝土、钢筋混凝土结构和构件;
- (7) 薄壁钢筋混凝土结构,桥梁上部主梁钢筋混凝土结构,承受中、重、特重交通量的桥梁下部钢筋混凝土结构;
- (8) 使用冷拉钢筋或冷拔低碳钢丝的钢筋混凝土结构(防止钢材腐蚀);
- (9) 集料具有碱活性的水泥混凝土结构。

1.2.4 含有强电解质无机盐类的早强剂、早强型减水剂和早强型高效减水剂严禁用于下列公路工程水泥混凝土结构中:

- (1) 有照明和排风设施的隧道钢筋混凝土衬砌,使用阴极防护措施的桥梁钢筋混凝土结构,埋置照明线路、使用直流电以及距离直流电源100m以内的钢筋混凝土结构;
- (2) 有镀锌钢材或与铝铁相接触部位的结构,以及有外露钢筋预埋铁件而无防护措施的结构;
- (3) 海水、卤水及地下含有酸、碱腐蚀介质中的墩、桥墩、桩、桥桩、系梁等钢筋混凝土结构。

这是因为公路工程中水泥混凝土结构是处在车轮冲击、振动和疲劳动载或超载作用下的结构物,疲劳应力和瞬间冲击振动应力值很高,对钢筋、钢丝的腐蚀和锈蚀会造成水泥混凝土微裂缝、裂缝及截面损

失,并加速结构的破坏。第(3)条和第(4)条的规定与国标《混凝土外加剂应用技术规范》(GB 50119—2003)是一致的。

1.2.5 含钾、钠离子的早强剂及其复合早强剂,用于与水接触或潮湿环境中的公路工程水泥混凝土结构时,当集料具有碱活性时,由外加剂带入的碱含量($\text{Na}_2\text{O} + 0.658 \text{ K}_2\text{O}$)不宜超过 $1.0\text{kg}/\text{m}^3$,由外加剂、掺和料及水泥带入水泥混凝土中的总含碱量不应大于 $3.0\text{kg}/\text{m}^3$ 。对于含钾、钠离子的强碱性早强剂,为了防止碱集料反应,潮湿环境中的水泥混凝土结构必须限制碱含量,同时不得使用碱性集料。

1.2.6 含三乙醇胺类的早强剂、早强型减水剂和早强型高效减水剂不宜用于蒸汽养生或干热养生的水泥混凝土预制构件,原因是干热和蒸养条件下,三乙醇胺类早强剂将很快分解或挥发损失掉,丧失其早强作用;若静停时间过短,蒸养温度过高或温升过快时,水泥混凝土会产生爆皮现象,影响水泥混凝土构件的质量,因此要加以限制。其他早强剂可用于蒸汽养生或干热养生的水泥混凝土预制构件。

2 早强型冷再生粒料初步试验分析

室内试验所采用的旧沥青路面材料是浙江省 S316 龙葛线龙游段在路面大修养护中产生的,新料为开采于青龙山的石料,属石灰岩。

早强型冷再生粒料试验方案如下。

(1)初步选择早强剂:根据规范及经验,选取几种早强剂或早强剂组合。

(2)选定早强剂:根据选取的早强剂或者早强剂组合,进行 3d 无侧限抗压强度和 7d 无侧限抗压强度试验,从中选出早强效果较好的早强剂。

(3)确定早强剂用量:根据选择好的早强剂,选择 2%、4%、8%、16% 四个早强剂掺量进行对比试验,从中选出早强效果最好的早强剂用量。

2.1 早强剂初步选择

根据《公路工程水泥混凝土外加剂与掺合料应用技术指南》中所介绍的常用外加剂,选择配比后确定五种,其中四种为:商品早强剂、纯氯化钙、纯硫酸钠、硫酸钠与氯化钙,按质量比 3/1 配比后,再按其总质量的 1/10 掺入三乙醇胺。另一种是硫酸钠与三乙醇胺,按质量比 1/10 配比。

2.2 早强剂掺量的确定

由于早强剂作用于水泥,试验中水泥用量越高试验效果就会越明显,所以本次试验都采用 5% 水泥用量,级配选用 X 级配。另外,为了更好地对比冷再生材料加入早强剂的各方面性能,特取一组全新料级配来做对比,全新料记为 Q 级配,水泥用量也为 5%,Q 级配配比为 0~5mm:35%,5~10mm:25%,10~20mm:10%,20~30mm:30%,级配曲线接近《公路路面基层施工技术规范》(JTJ034—2000)推荐的 2 号级配范围中值。

由《公路工程水泥混凝土外加剂与掺合料应用技术指南》中常用早强剂掺量限制的规定(见表 1),一般硫酸钠掺量不大于水泥用量的 3%,而本试验中采用水泥用量的 2%、4%、8%、16%,主要是考虑到掺量低时用量只有几克,在试件成型的过程中无法与水泥混合料搅拌均匀,不能使早强剂发挥作用。另外,试件成型过程中,将每个试件所用早强剂先溶于拌和所用水中,这样能够使早强剂更均匀。

按照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009)(T0805—1994)的规定,分别根据前文确定的不同水泥用量下的最大干密度和最佳含水率,由静压法成型直径 $\Phi 150\text{mm}$,高度 150mm 的圆柱体试件,最后置于 $20 \pm 2^\circ\text{C}$,相对湿度大于 95% 的环境中进行养生。试验结果见表 2。

常用早强剂掺量限值

表 1

混凝土种类	使用环境	早强剂成分	掺量/水泥用量不大于(%)
预应力混凝土	干燥环境	硫酸钠	1.00
		三乙醇胺	0.05
钢筋混凝土	干燥环境	氯离子(Cl^-)	0.60
		硫酸钠	2.00
		与缓凝剂减水剂复合的硫酸钠	3.00
		三乙醇胺	0.05
	潮湿环境	硫酸钠	1.50
		三乙醇胺	0.05
有饰面要求的混凝土		硫酸钠	0.80
素混凝土		氯离子(Cl^-)	1.80

各早强剂掺量下 3d、7d 强度

表 2

项目	掺量	旧料 X 级配—5% 水泥用量					新料 Q 级配
		①号早强剂	②号早强剂	③号早强剂	④号早强剂	⑤号早强剂	③号早强剂
3d 强度	早强剂掺量 0%	2.96	2.96	4.32	3.14	3.14	3.17
	早强剂掺量 2%	4.07	3.84	5.27	4.37	3.85	3.80
	早强剂掺量 4%	3.89	3.69	5.44	4.23	4.25	3.86
	早强剂掺量 8%	3.97	3.68	5.58	4.12	4.30	3.89
	早强剂掺量 16%	4.06	3.81	5.60	4.49	4.42	3.97
7d 强度	早强剂掺量 0%	4.01	4.01	5.32	4.17	4.17	4.02
	早强剂掺量 2%	4.50	4.20	5.43	5.11	4.32	4.36
	早强剂掺量 4%	4.41	4.23	5.76	5.17	5.08	4.58
	早强剂掺量 8%	4.32	4.41	5.88	5.37	5.01	4.59
	早强剂掺量 16%	4.49	4.44	5.96	5.33	4.87	4.61

从表 2 中可知,各早强剂的早强效果各不相同,早强剂用量对试件强度影响也不一样,总体来看是各种早强剂都能取得预期效果,即加入早强剂试件 3d 强度能够达到无早强剂 7d 强度,随着早强剂用量的增大,试件强度也随之增大,但是也有例外,例如①号早强剂在 2% 掺量下强度就已经达到一个最大值。④⑤号早强剂属于复合早强剂,早强效果更为明显。

图 1 ~ 图 5 为各种早强剂的使用效果。

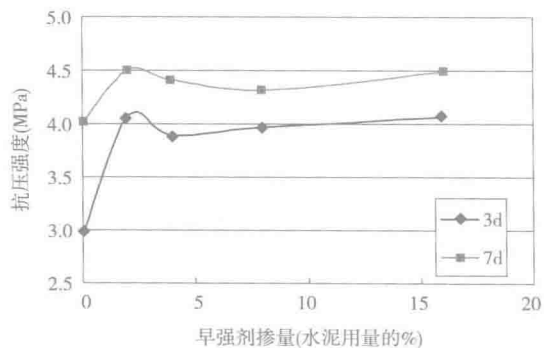


图 1 ①号早强剂使用效果

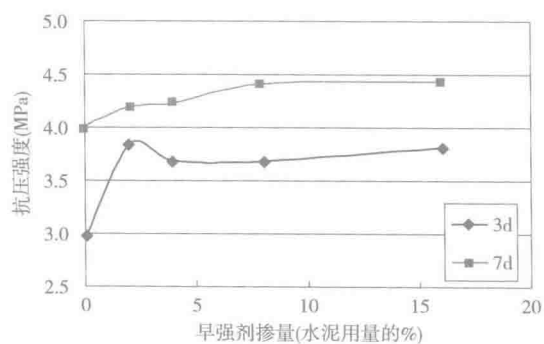


图 2 ②号早强剂使用效果

从图1可以看出,加入早强剂后再生料3d抗压强度明显增加,甚至超过了无早强剂7d抗压强度,说明早强剂效果比较明显。从曲线上可以看出,3d和7d强度曲线走势基本相似,随早强剂掺量增加,再生料强度并未呈现持续上升,而是稍有下降趋势,说明①号早强剂的最佳掺量为水泥用量的2%。

从图2可以看出,加入早强剂后再生料3d抗压强度显著增加,基本达到了无早强剂7d抗压强度,说明早强效果较为明显,从3d强度曲线上可以看出随着早强剂掺量的增加,强度未持续上升,而是稍有下降趋势。7d强度曲线则是随着早强剂掺量增加呈持续上升趋势,但上涨逐渐趋缓,这说明早强剂对3d强度影响稍大,对后期强度影响则偏小,对于②号早强剂推荐最佳掺量为水泥用量的2%。

从图3可以看出,早强效果较为明显,7d强度曲线没有3d强度曲线上升速度快,同样说明早强剂对3d强度影响稍大,对后期强度影响小,对于③号早强剂,推荐最佳掺量为水泥用量的2%。

从图4可以看出,加入早强剂后,再生料的3d抗压强度明显增加,超过了无早强剂7d抗压强度,说明④号早强剂效果非常明显,体现出复合型早强剂的优越性。从曲线上可以看出,3d和7d强度曲线走势基本相似,对于④号早强剂,推荐最佳掺量为水泥用量的2%。

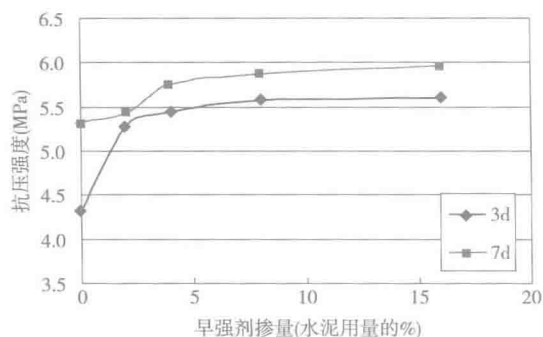


图3 ③号早强剂使用效果

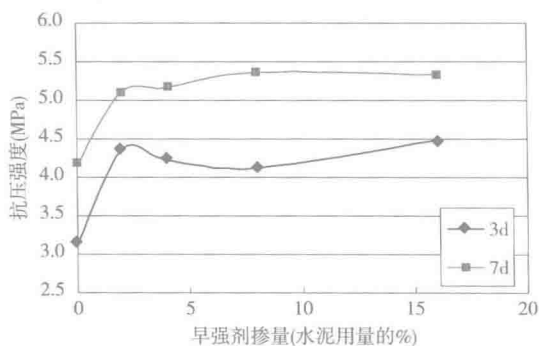


图4 ④号早强剂使用效果

从图5可以看出,加入早强剂后的3d抗压强度明显增加,在高于4%掺量后能够达到无早强剂7d抗压强度,表明⑤号早强剂效果也很明显。从曲线上可以看出,3d强度曲线较为规则,呈上升趋势,而7d强度曲线在4%掺量下有最大值,所以对于⑤号早强剂,推荐最佳掺量为水泥用量的4%。

图6为Q级配下③号早强剂作用效果。

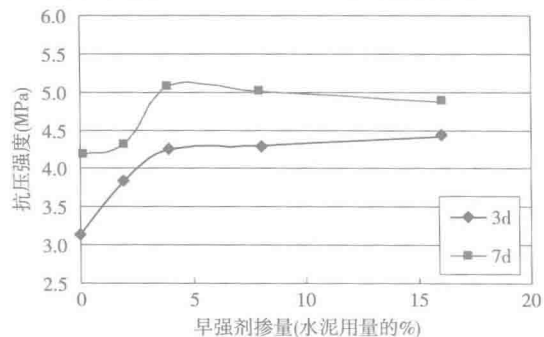


图5 ⑤号早强剂作用效果

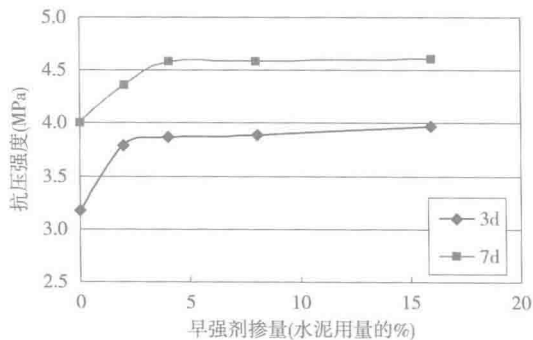


图6 Q级配下③号早强剂作用效果

新料Q级配所用早强剂为③号早强剂,与图3最有可比性。从图6可以看出,加入早强剂后3d抗压强度能够达到无早强剂7d抗压强度,图6与图3的最大区别是两条曲线跨度大,3d强度与7d强度差值较大,说明新料在后期强度的增长高于旧料。

3 早强型冷再生粒料力学性能与路用性能研究

本试验通过室内试验系统研究早强型冷再生混合料的力学性能、抗冲刷性和抗收缩性,以此来评价早强型冷再生混合料路用性能。为了更好地对比早强剂对冷再生材料各方面性能的影响,仍选取X和Q

级配进行试验。

3.1 早强型冷再生粒料力学性能

为了评价加入早强剂后水泥稳定旧沥青路面材料的物理力学性能,更好地了解早强剂对冷再生混合料的影响,本试验设计了一系列室内试验:选用③、④、⑤号早强剂,早强剂掺量选择2%、4%两种,然后将加入早强剂的水泥稳定旧沥青路面材料试件在标准条件下养生3d、7d、28d和90d,进行力学性能测试,测试强度指标包括无侧限抗压强度、劈裂强度和抗压回弹模量。

3.1.1 无侧限抗压强度

不同级配、不同早强剂种类和用量的再生料在相同试验条件下测其无侧限抗压强度,结果如图7~图10所示。

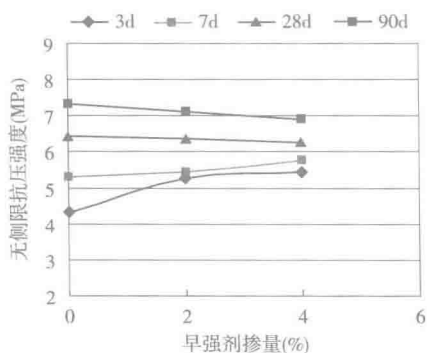


图7 ③号早强剂 X 级配各龄期无侧限抗压强度

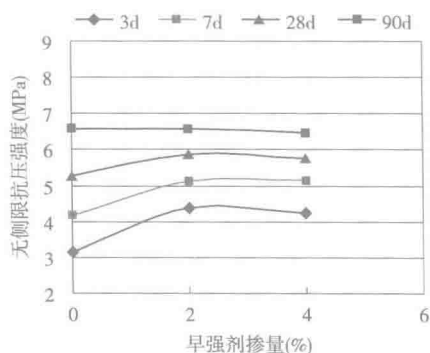


图8 ④号早强剂 X 级配各龄期无侧限抗压强度

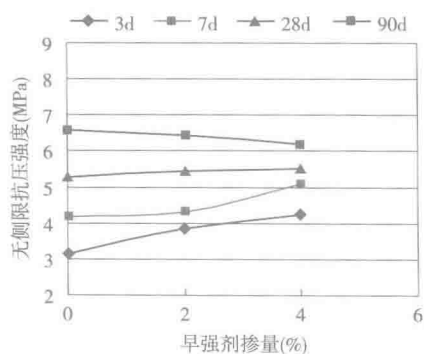


图9 ⑤号早强剂 X 级配各龄期无侧限抗压强度

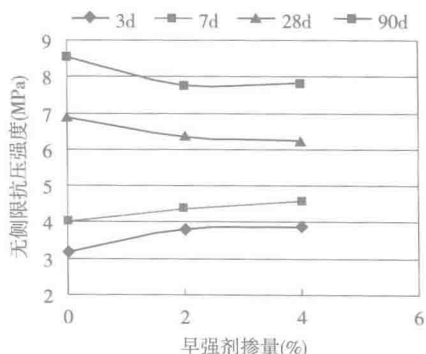


图10 ③号早强剂 Q 级配各龄期无侧限抗压强度

从图7可以看出,③号早强剂在2%和4%早强剂掺量下3d强度可以达到不加早强剂时7d强度,达到了公路路面基层施工技术规范对基层强度的要求,满足快速施工的要求。从后期强度增长情况来看,早强剂对后期强度没有起到增大的效果,相反,早强剂掺量高的再生料,后期强度比无早强剂的试件低,说明③号早强剂对后期强度会有影响。

从图8可以看出,④号早强剂在2%和4%早强剂掺量下3d强度可以达到无早强剂时7d强度,能达到《公路路面基层施工技术规范》对基层强度的要求,满足快速施工的要求,且4%掺量没有2%掺量强度高。从后期强度增长情况来看,④号早强剂后期强度基本没有降低。

从图9可以看出,⑤号早强剂在2%和4%早强剂掺量下3d强度可以达到无早强剂时7d强度,能达到基层施工技术规范对基层强度的要求,满足快速施工要求,4%掺量下比2%掺量强度高。从后期强度增长情况来看,90d强度随早强剂掺量增加而下降,表明⑤号早强剂可能会降低后期强度。

从图10可以看出,③号早强剂也降低由新料组成的Q级配后期强度。

综合图7~图10可以看出,新料后期强度明显要高于旧料,这说明新料中材料均匀,后期强度高。对

比各图可以看出,早强剂对新旧料的影响效果是相同的,早强剂不能对后期强度起到增大的作用,有时反而会略微降低后期强度,只有④号早强剂没有降低试件强度,分析原因可能是④号早强剂中参加了有机物三乙醇胺的缘故。

3.1.2 劈裂强度

参加早强剂再生料的劈裂强度试验结果如图 11 ~ 图 14 所示。

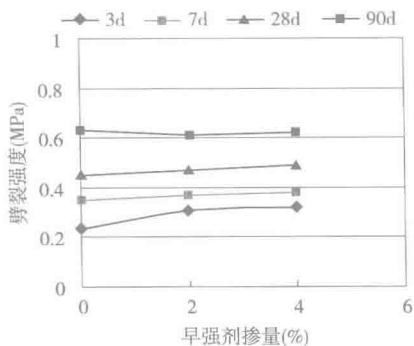


图 11 ③号早强剂 X 级配各龄期劈裂强度

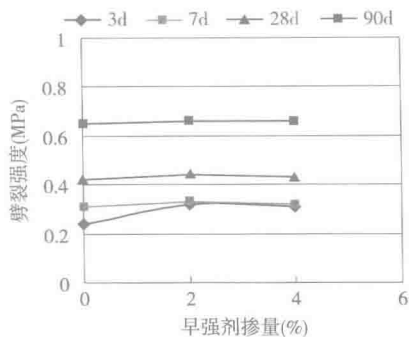


图 12 ④号早强剂 X 级配各龄期劈裂强度

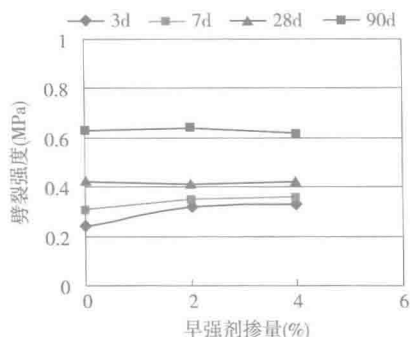


图 13 ⑤号早强剂 X 级配各龄期劈裂强度

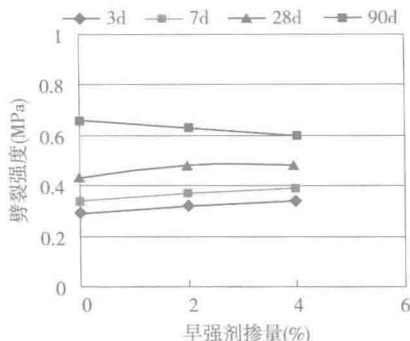


图 14 ③号早强剂 Q 级配各龄期劈裂强度

从图 11 ~ 图 14 可以看出,在加入早强剂条件下,水泥稳定再生料的劈裂强度随早强剂用量增加并未呈现出一定的规律,但加入早强剂的再生料 3d 劈裂强度均可达到无早强剂 7d 强度。随着龄期的增长,早强剂效果逐渐消失,特别是在 28d 龄期后,有早强剂和无早强剂试件强度相同。90d 龄期下加入早强剂再生料的强度反而略有降低,说明部分早强剂对后期强度有削弱作用。劈裂强度规律和无侧限抗压强度变化规律基本一致。同时发现早强剂对新旧料影响效果相同。

图 15 ~ 图 17 给出了三种早强剂条件下抗压强度与劈裂强度的相关性分析结果。

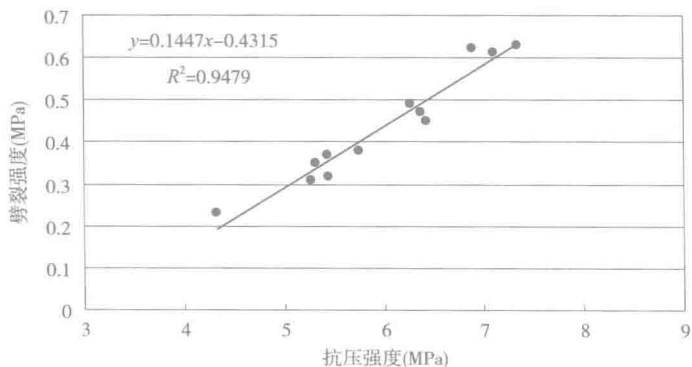


图 15 ③号早强剂劈裂强度和抗压强度的回归关系

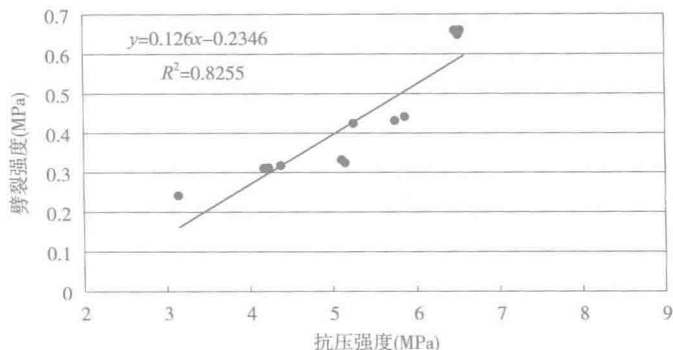


图 16 ④号早强剂劈裂强度和抗压强度的回归关系

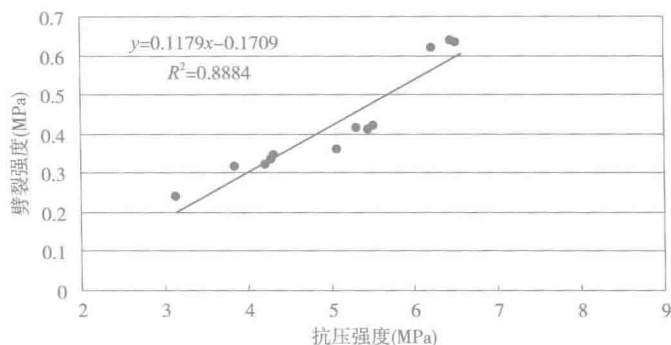


图 17 ⑤号早强剂劈裂强度和抗压强度的回归关系

由线性回归方程可以看出,加入早强剂的再生料抗压强度与劈裂强度之间具有很好的线性关系,表明劈裂强度随早强剂掺量、养生龄期、试验温度和级配情况的变化规律基本与抗压强度变化规律一致;从相关性来看,③号早强剂两者的相关系数明显高于④号和⑤号,这说明③号早强剂条件下劈裂强度和抗压强度变化规律相似度高。④号和⑤号早强剂都是复合型早强剂,对强度的影响效果会有差异,所以回归系数偏低。

3.1.3 抗压回弹模量

加入早强剂条件下试件不同龄期的抗压回弹模量变化规律结果如图 18 ~ 图 21 所示。

从图 18 ~ 图 21 可以看出,早强剂水泥稳定再生料的抗压回弹模量随早强剂用量的增加并不呈现一定的规律。加早强剂再生料 3d 和 7d 抗压回弹模量比无早强剂的模量要大。但随着龄期的增长,早强剂的效果逐渐弱化,特别在 28d 龄期后,有无早强剂模量相当。抗压回弹模量规律与无侧限抗压强度和劈裂强度规律基本一致。对比各图还发现早强剂对新旧料影响效果相同。

图 22 ~ 图 24 为三种早强剂作用下,冷再生混合料的抗压回弹模量与抗压强度之间的关系。

从图 22 ~ 图 24 可以看出,三种早强剂作用下冷再生混合料的抗压回弹模量与抗压强度之间都具有很好的线性关系,这表明早强剂的加入不会影响到抗压回弹模量和抗压强度之间的关系。有早强剂加入时,在得到一个较易测定的指标后,可以间接推算另一个指标。

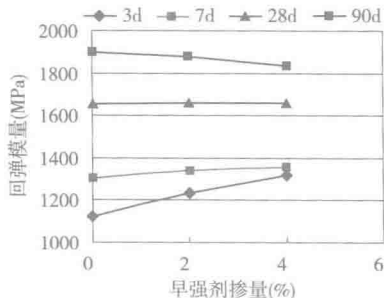


图 18 ③号早强剂 X 级配各龄期抗压回弹模量

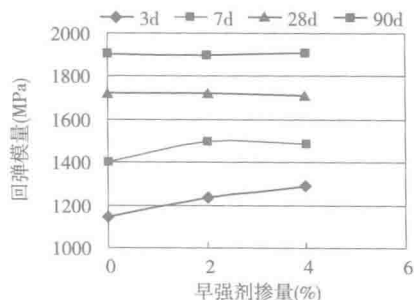


图 19 ④号早强剂 X 级配各龄期抗压回弹模量

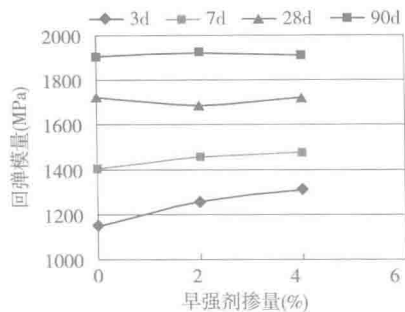


图 20 ⑤号早强剂 X 级配合龄期抗压回弹模量

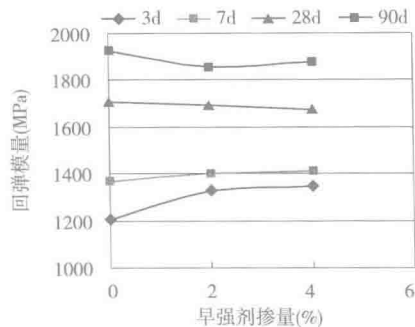


图 21 ③号早强剂 Q 级配合龄期抗压回弹模量

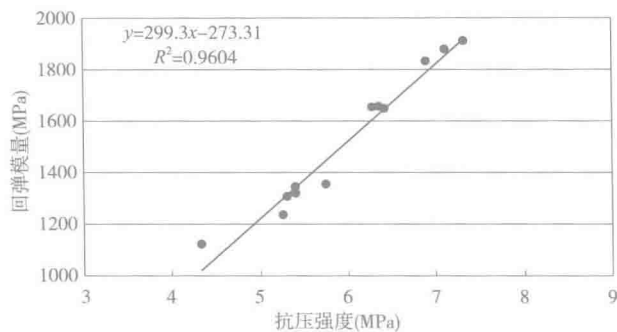


图 22 ③号早强剂抗压回弹模量和抗压强度回归关系

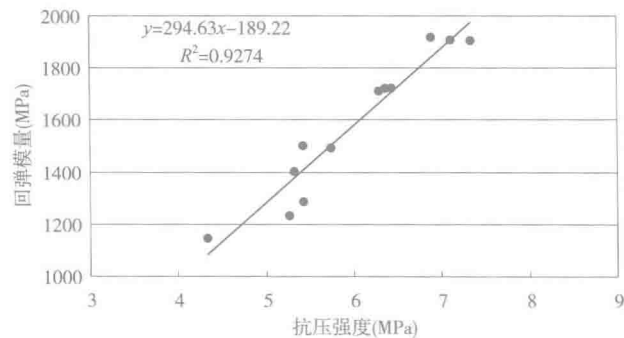


图 23 ④号早强剂抗压回弹模量和抗压强度回归关系

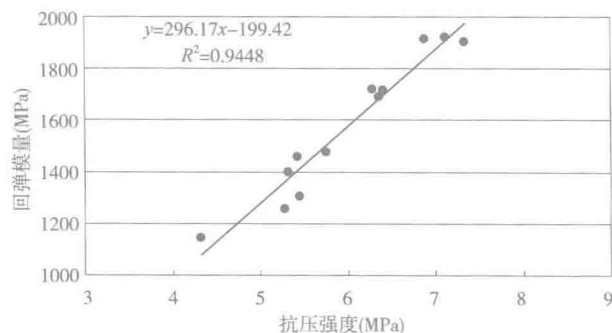


图 24 ⑤号早强剂抗压回弹模量和抗压强度回归关系

3.2 早强型冷再生粒料路用性能

3.2.1 抗冲刷性

加入早强剂的水泥稳定再生料是否对基层材料的抗冲刷性有所影响,本节首先对这一问题进行

研究。

(1) 试验方法

本试验采用基层材料冲刷试验机进行抗冲刷试验,仪器、试件成型养生、试验方法同第四章,同样选用 28d 龄期。对 X 级配 5% 水泥用量分别加入③、④、⑤三种早强剂,早强剂掺量都是 4%。然后将试件在标准环境下养生。试验时将试件在到达龄期的前一天浸水,饱水 24h 备用。

(2) 试验结果及分析

表 3 和表 4 分别为加入早强剂和无早强剂条件下三种水泥用量的冲刷试验结果。

早强型冷再生材料冲刷试验结果

表 3

试验时间 (min)	累计冲刷量 (g)			单位时间内冲刷率 (g/min)		
	③	④	⑤	③	④	⑤
10	9.5	8.9	10.2	0.96	0.89	1.02
20	20.3	21.3	19.8	1.015	1.065	0.99
30	28.3	29.3	27.2	0.94	0.98	0.901

注:表中冲刷率为累计冲刷量与累计冲刷时间的比值。

无早强剂水泥稳定冷再生料冲刷试验结果

表 4

试验时间 (min)	累计冲刷量 (g)			单位时间内冲刷率 (g/min)		
	3% 水泥用量	4% 水泥用量	5% 水泥用量	3% 水泥用量	4% 水泥用量	5% 水泥用量
10	14.2	8.7	4.4	1.42	0.87	0.44
20	28.9	20.2	11.7	1.445	1.01	0.585
30	34.5	29.1	18.3	1.15	0.97	0.61

注:表中冲刷率为累计冲刷量与累计冲刷时间的比值。

可以看出,三种早强剂下各时间的累积冲刷量相差不大,没有明显规律。在同为 5% 水泥用量条件下累积冲刷量中有早强剂条件下要比无早强剂条件下大。说明虽然早强剂能够提高水泥的早期强度,但是会影响到水泥与粒料的结合,降低各档料之间的黏结程度,抵抗冲刷的效果降低。但从单位时间内冲刷率来看单位时间内冲刷率不到 2g/min,说明加早强剂冷再生粒料仍然具有良好的抗冲刷性。

3.2.2 干燥收缩

(1) 试验方法

选用 X 级配 5% 水泥用量分别加入③、④、⑤三种早强剂,成型 10cm × 10cm × 40cm 的小梁,成型后用塑料袋将试件包裹起来,以防止水分散失,在 20 ± 2℃ 条件下养生一天,使其具有一定的强度能够直立,然后撕去包裹在试件上的保鲜膜,在顶面放一块玻璃片,将千分表接触玻璃片中心处,测其变形。

准备工作完成后,开始测量试件的初始干燥收缩及相应含水率。测试过程如下:在试验开始前 1 ~ 2d,每 3h 测一次应变值和相应含水率,3d 后,每 12h 内测一次应变值和相应含水率,直至连续三次含水率没有发生变化为止。

为了减少误差,本试验称重时应采用精度较高的电子秤,测量干缩变形采用千分表。对于试验中水泥稳定再生料同一批试件一次性进行测试,使测量数据更具可比性。同一级配的混合料应同时成型三个试件,其中两个用来进行应变测量,剩余的一个用来测量各时间段的失水量。

(2) 试验结果及分析

干燥收缩试验结果如表 5 所示。

从表 5 可看出,各早强剂作用下干缩系数相差不大。干缩的主要原因是随含水率的减少,水泥稳定再生料依次经受了毛细管张力作用、吸附水和分子间力作用及层间水作用。水的蒸发引起材料宏观上的干燥收缩。水泥稳定材料主要因水化作用而产生强度,随着水泥水化的完成,水分有所丧失,从而引起收

缩,对比以往试验结果 5% 水泥用量下干缩系数为 458×10^{-6} ,加入早强剂后干缩系数明显增大。分析原因认为早强剂的加入加快了水泥水化作用,所以会使干缩现象明显,干缩系数增大。

加早强剂再生料干缩试验结果

表 5

级配类型	早强剂编号	平均干缩系数($\times 10^{-6}$)
X 级配	③	827
	④	782
	⑤	769

3.2.3 温度收缩

(1) 试验方法

成型 $10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 40\text{cm}$ 的小梁,置于 $20 \pm 2^\circ\text{C}$,相对湿度大于 95% 的环境中养生,养生结束后,将试件放入 105°C 烘箱中烘 10 ~ 12h 至恒重,使试件中没有自由水的存在。烘干后将试件放到干燥通风的地方至常温。由于试件表面比较粗糙,在试件表面放上玻璃片,然后将试件放于温缩机内,设定好温度变化范围,在一定时间内电脑就会输出温度收缩数据。

仍采用 X 级配在 5% 水泥用量下③、④、⑤三种早强剂成型试件,温度变化范围为 $-25^\circ\text{C} \sim +25^\circ\text{C}$,数据采集时间为 40h,采集间隔时间为 5min。

(2) 试验结果及分析

因为数据采集间隔为 5min,所以电脑输出的数据非常多,将各个温度段数据取均值,然后按照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009) T0855—2009 中仪表法的处理方法处理得到温缩试验结果。

从试验结果看(表 6),三种早强剂作用下温缩系数相差不大。无早强剂 5% 水泥用量下温缩系数为 $2.71\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$,略比加入早强剂后系数小,对比发现数值相差不大,说明加早强剂后对试件水泥稳定再生料温缩性影响不大。

加早强剂再生料温缩试验结果

表 6

早强剂编号	不同温度($^\circ\text{C}$)区间的温度收缩系数($\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$)					
	-25 ~ -15	-15 ~ -5	-5 ~ 5	5 ~ 15	15 ~ 25	平均值
③	1.23	2.12	5.65	5.86	4.34	3.84
④	1.08	2.13	5.48	6.87	4.67	4.046
⑤	1.36	1.67	4.39	5.71	4.06	3.438

通过大量室内试验,研究了早强型冷再生混合料的各龄期抗压强度、劈裂强度、回弹模量等力学性能及抗冲刷性能和干缩与温缩等路用性能。试验表明在加入早强剂后材料 3d 能够达到 7d 强度,即早强型冷再生材料的力学性能能满足规范中对基层材料的要求。路用性能方面,加入早强剂后会对部分性能略有影响,例如抗冲刷性能和干缩性能,但完全可以满足高级公路底基层和二级公路基层的要求。

4 早强型冷再生粒料结构设计参数研究

由试验研究可知,加入早强剂后水泥稳定冷再生料的各项性能与水泥稳定类基层材料类似。根据冷再生材料的特性提出合适的设计参数代表值,从而为早强型再生路面结构设计提供参考。

在进行路面结构设计时,需要水泥稳定冷再生材料的 90d 抗压回弹模量参数进行设计,需要 90d 劈裂强度进行层底弯拉应力验算。根据室内试验结果可以得到加入早强剂后 90d 龄期水泥稳定冷再生材料的试验数据(见表 7)。

从表 7 中可以看出,在加入早强剂后 90d 抗压回弹模量和劈裂强度都略有变化,通过统计分析数值变化都在 1% 左右,完全可以忽略不计,所以得出如下结论:早强剂对后期抗压回弹模量和劈裂强度