

文章编号: 0451-0712(2005)07-0131-06

中图分类号: U416.2

文献标识码: B

# 粉煤灰对水泥稳定级配碎石路面 基层结构强度的影响

梁志林, 胡 东

(河北省张家口市交通局 张家口市 075000)

**摘 要:** 通过对水泥稳定级配碎石与水泥粉煤灰稳定级配碎石 2 种结构不同剂量结合料配合比的 7 d、28 d、90 d、180 d 等 4 个龄期抗压强度, 90 d 龄期的抗弯拉与劈裂强度, 以及施工延迟时间对强度的影响等室内试验结果的对比分析, 结合 2 种结构试验路段的钻孔取芯强度等指标观测比较, 表明水泥粉煤灰稳定级配碎石结构具有很多优点, 具有显著的经济和社会效益。

**关键词:** 粉煤灰; 水泥稳定碎石; 强度; 影响

## 1 概述

道路主要是由路基、路面组成的, 其中路面基层是道路的主要持重层, 又是应力扩散层。它位于路面面层下, 车辆荷载对道路产生的应力通过基层传递于路基。道路是暴露在大自然中的带状构造物, 特别是路面直接承受着车辆荷载和大自然的作用, 受大自然影响较大。因此, 路面基层结构性能的好坏, 直接影响道路的使用品质及使用寿命。

在“八五”及“九五”期间, 国家对道路路面结构做了大量研究工作, 已经取得了可喜的成果。石灰稳定类、水泥稳定类及石灰稳定工业废渣等 3 类无机结合料结构得到了广泛的应用, 经实践证明是可行的、成功的。但各种结构的适用性是不同的, 各具有特点: 石灰稳定类结构所用材料可就地取材, 施工工艺简单, 较经济, 但其结构强度较低, 水稳性较差, 一般用于低等级公路基层及高等级公路底基层; 水泥稳定类结构强度高, 水稳性好, 但其需厂拌及摊铺机摊铺, 对材料级配要求严格, 施工工艺较复杂, 造价较高, 一般用于高等级公路路面基层; 石灰稳定工业废渣类结构综合运用了工业废渣, 变废为宝, 同时其结构强度比石灰稳定类结构大幅度提高, 施工工艺较简单, 在一定条件下造价较低, 是“九五”科技攻关推荐的路面基层结构, 20 世纪 90 年代在我国高等级公路中得到了广泛运用, 但其缺点是早期强度较低, 在不能严格限制交通的情况下, 表面易磨损、松散,

很可能出现早期疲劳破坏。

基于上述各类基层结构的特点及使用情况, 我们推出了“水泥粉煤灰稳定级配碎石”作为高等级公路路面基层结构, 其目的是充分利用各类结构的优点, 弥补其缺点, 寻求性能更优、更经济、施工更方便、更宜保证工程质量的路面结构。

水泥粉煤灰稳定类结构, 在我国现行的《公路沥青路面设计规范》(JTJ 014-97) 及《公路路面基层施工技术规范》(JTJ 034-2000) 中均未正式列入, 只是在《公路沥青路面设计规范》(JTJ 014-97) 5.1.4 水泥稳定类第 4 条“综合稳定”第二款中叙述为“水泥稳定粒径较均匀、且不含或含细粒很少的砂砾、碎石以及不含土的砂时, 宜在集料中添加 20%~40% 的粉煤灰, 或添加剂量为 10%~12% 的石灰土进行综合稳定”, 既没有设计参数, 也没有相应的技术标准及施工工艺要求。水泥粉煤灰稳定类基层结构研究的意义是补充和完善现行的《公路沥青路面设计规范》(JTJ 014-97) 和《公路路面基层施工技术规范》(JTJ 034-2000) 中基层的结构类型, 为该结构的推广应用确定合理的配合比和技术标准, 争取列入规范, 取得规范的认可。

## 2 水泥粉煤灰稳定碎石强度形成原理

### 2.1 粉煤灰的火山灰性质

粉煤灰的主要成分为氧化硅、氧化铝玻璃体, 粉



煤灰具有火山灰性质即它能在碱环境中溶解,与氧化钙反应,例如与水泥水化时产生的氢氧化钙反应,生成发展强度的水化硅酸钙。

粉煤灰的化学成分和矿物组成对水泥粉煤灰稳定碎石基层结构强度产生不同的影响,例如粉煤灰中的 $\text{SO}_3$ 有利于其早期强度的形成。例如粉煤灰中只是那些在水泥碱性环境中迅速溶解的 $\text{SiO}_2$ 才能发生火山灰反应,只有可溶硅才能与氢氧化钙生成发展强度的水化硅酸钙,故粉煤灰中可溶硅是粉煤灰潜在活性的物性指标。火山灰反应与其他化学反应一样,可以用提高温度和掺加其他化学速凝剂的方法加速其反应。

## 2.2 水泥粉煤灰稳定碎石强度形成机理

水泥粉煤灰稳定碎石的强度由 2 部分组成。

一是集料之间的相互嵌挤形成的骨架强度。在水泥粉煤灰稳定碎石试件成型时(或在施工中经碾压成型),由于机械压实的压力作用,粉煤灰和水泥的混合物填充级配碎石中的空隙,将碎石空隙中的空气排出,并在外力(机械力)的作用下,紧密压实,使得粉煤灰和粉煤灰之间、粉煤灰与水泥之间及粉煤灰与碎石之间的颗粒彼此靠近,使外力所做的绝大部分功转变成颗粒间的范德华力,这一作用为物理—力学作用。它使得松散的颗粒重新排列,缩短颗粒间距离,使水泥粉煤灰能够聚结,从而也为发生化学反应提供了条件。

二是结合料之间、结合料与集料之间形成的胶结强度。水泥的水化作用、水泥粉煤灰之间的火山灰反应,以及水泥与集料中活性土之间的离子交换作用、团粒作用和碳酸化作用等一系列复杂且相互交织的物理—力学、物理—化学及化学作用使其强度进一步提高。

通常,机械压实、部分水泥水化作用是形成水泥粉煤灰稳定碎石早期强度的突出原因。水泥的进一步水化及火山灰反应则是形成水泥粉煤灰稳定碎石后期强度的主要原因。

## 3 研究的方法和主要内容

### 3.1 研究的方法

研究采用的主要方法是对比试验法,以我国目前高等级公路路面基层使用最广泛的水泥稳定级配碎石与水泥粉煤灰稳定级配碎石进行多方面的结构性能对比,从而评价其结构是否优良、经济是否合理。我们首先进行了大量室内试验,选取最佳配合

比,再铺筑试验路,进行检验和观察,来验证室内试验结果的可靠性及实际使用效果。

### 3.2 研究的主要内容

#### 3.2.1 室内试验

(1)水泥粉煤灰稳定级配碎石不同水泥剂量、不同粉煤灰掺量、不同龄期的抗压强度;

(2)与研究结构水泥剂量相对应的水泥稳定级配碎石不同龄期的抗压强度;

(3)结构抗弯拉性能对比;

(4)延迟成型时间对结构强度的影响。

为探讨水泥粉煤灰稳定碎石结构不同水泥剂量、不同粉煤灰掺量对结构性能的影响,试验按照《公路路面基层施工技术规范》(JTJ 034—2000)对结构材料配合比设计的要求,分别选用水泥及粉煤灰的掺量:水泥掺量选用 3%、4%、5%、6%、7% 共 5 种,粉煤灰掺量为 10%、12%、15% 共 3 种,并相应地配入级配碎石。

通过以上试验,确定最佳粉煤灰掺量、最佳水泥剂量、最优的配合比设计。

#### 3.2.2 室外试验

(1)以室内试验数据为依据,采用 4% 水泥剂量,掺 10%、12% 粉煤灰的 2 种配合比,共 3 种不同配合比结构,铺筑 3 段共计 10.12 km 试验路,并进行检测。

第一种:水泥:碎石( $C:S$ )=7:93(对比方案)。

第二种:水泥:粉煤灰:碎石( $C:F:S$ )=4:10:86(推荐最佳方案)。

第三种:水泥:粉煤灰:碎石( $C:F:S$ )=4:12:84(推荐的比较方案)。

(2)对试验路钻孔取芯,测定各种结构实际的抗压强度。

## 4 试验及观测成果

### 4.1 室内试验成果

#### 4.1.1 无侧限抗压强度

2 类结构的各种配合比无侧限抗压强度汇总见表 1。水泥稳定碎石类随水泥用量的增加,强度有明显的增长,其初期强度比粉煤灰含量为 12%、15% 的水泥粉煤灰稳定碎石类略高,后期强度除水泥剂量为 3%、7% 这 2 组外,中间各组增长较好,可见最佳水泥剂量位于 4%~6% 之间。水泥粉煤灰稳定碎石类随水泥用量增加,初期和后期强度都是增加的,且较均匀,但粉煤灰含量的大小不如水泥对强度的影响大,规律性也并不太一致,但总的趋势是粉煤灰含



表 1 水泥粉煤灰稳定碎石与水泥稳定碎石基层各种配合比无侧限抗压强度汇总

结构类别	配合比(C : F : S)	无侧限抗压强度计算值(保证率 95%) /MPa				增长率	
		7 d	28 d	90 d	180 d	$R_{90}/R_7$	$R_{180}/R_7$
水泥稳定碎石	3 : 0 : 97	1.746	2.220	3.500	5.283	2.00	3.03
	4 : 0 : 96	2.993	4.028	4.755	10.138	1.59	3.39
	5 : 0 : 95	3.357	5.001	6.426	10.417	1.91	3.10
	6 : 0 : 94	3.650	5.596	7.220	11.595	1.98	3.18
	7 : 0 : 93	4.104	6.300	9.010	10.510	2.20	2.56
水泥粉煤灰稳定碎石	3 : 10 : 87	1.847	4.484	6.650	6.623	3.60	3.59
	4 : 10 : 86	3.015	5.421	7.360	13.053	2.44	4.33
	5 : 10 : 85	3.373	5.363	9.560	11.725	2.83	3.48
	6 : 10 : 84	3.789	6.017	11.140	13.480	2.94	3.56
	7 : 10 : 83	4.015	6.545	12.450	14.250	3.10	3.55
	3 : 12 : 85	2.167	4.919	6.850	6.143	3.16	2.83
	4 : 12 : 84	3.081	4.840	8.240	11.739	2.67	3.81
	5 : 12 : 83	3.295	5.509	8.980	13.699	2.73	4.16
	6 : 12 : 82	3.529	5.979	11.210	14.590	3.18	4.13
	7 : 12 : 81	3.841	6.271	11.530	14.600	3.00	3.80
	3 : 15 : 82	2.507	4.861	5.603	8.831	2.23	3.52
	4 : 15 : 81	2.754	5.067	8.910	10.510	3.24	3.82
	5 : 15 : 80	3.130	5.664	9.030	13.812	2.88	4.41
	6 : 15 : 79	3.125	6.091	9.230	13.830	2.95	4.43
	7 : 15 : 78	3.565	6.469	9.350	14.770	2.62	4.14

量高时,早期强度有所降低,但后期强度增加幅度大。

纯水泥类和水泥粉煤灰类相比,当水泥用量相同时,除粉煤灰含量为10%这1组外,水泥粉煤灰类早期强度比纯水泥类略低,但后期强度从90 d就超过了不少,180 d 强度更要好一些。

2 种结构水泥剂量为4%的配合比,强度上均有优势,可能是最佳剂量,也可能是级配组成较好、密

实性更好的原因。从水泥粉煤灰稳定类结构看,占优势的是粉煤灰含量为10%的1组。

4.1.2 劈裂强度

各类结构劈裂强度汇总见表2,随水泥剂量变化的规律如图1所示。由于所做试件数量较少,成果误差较大,从图1中很难找出规律性,但总体来看,可以认为在掺量合适的情况下,水泥粉煤灰稳定类结构优于纯水泥稳定类结构。

表 2 90 d 劈裂强度试验汇总

结构类别	配合比(C : F : S)	每块试件的劈裂强度 /MPa									评定值 /MPa
水泥稳定碎石	4 : 0 : 96	0.46	0.48	0.50	0.51	0.42	0.50	0.45	0.43	0.47	0.416
	5 : 0 : 95	0.80	0.77	0.82	0.82	0.86	0.84	0.79	0.79	0.79	0.763
	6 : 0 : 94	0.82	0.84	0.80	0.82	0.87	0.92	0.90	0.79	0.91	0.771
水泥粉煤灰稳定碎石	4 : 10 : 86	1.09	1.17	1.06	1.00	1.02	1.11	1.00	1.01	1.01	0.953
	5 : 10 : 85	0.83	0.91	0.85	0.85	0.86	0.86	0.90	0.86	0.83	0.815
	6 : 10 : 84	0.89	0.90	0.90	0.83	0.89	0.87	0.91	0.84	0.85	0.828
	4 : 12 : 84	0.68	0.55	0.60	0.56	0.72	0.63	0.65	0.63	0.67	0.540
	5 : 12 : 83	0.65	0.63	0.73	0.66	0.66	0.64	0.66	0.65	0.68	0.614
	6 : 12 : 82	0.85	0.86	0.85	0.89	0.83	0.82	0.84	0.83	0.83	0.809
	4 : 15 : 81	0.61	0.62	0.64	0.63	0.65	0.67	0.64	0.64	0.65	0.09
	5 : 15 : 80	1.02	0.97	0.96	1.03	0.99	1.01	0.99	1.02	1.02	0.960
	6 : 15 : 79	1.12	1.12	1.13	1.11	1.12	1.12	1.12	1.12	1.11	1.110



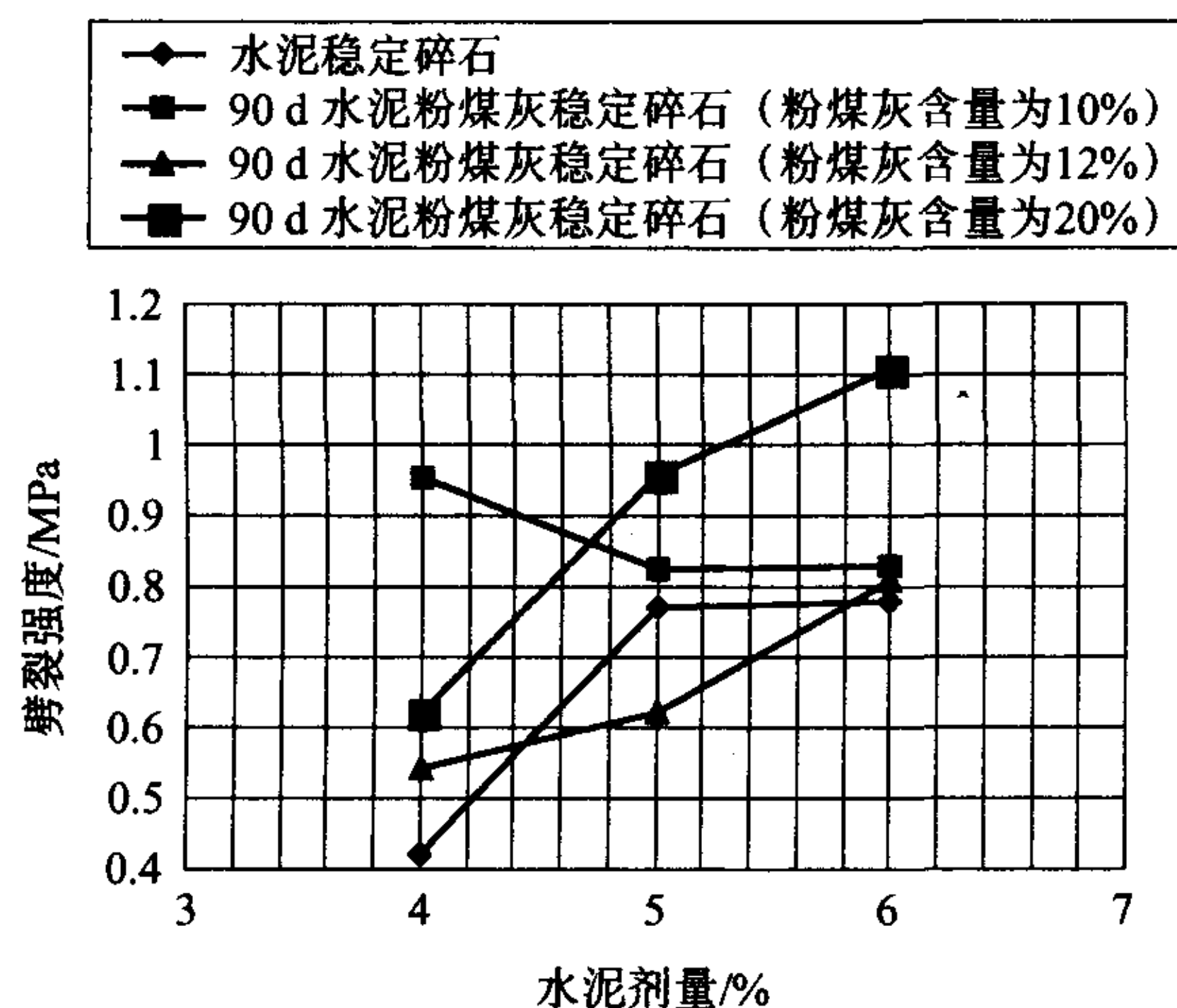


图1 水泥剂量与劈裂强度的关系

#### 4.1.3 抗折强度

各类结构抗折强度汇总见表3,随水泥剂量变化的规律如图2所示。从图2中看,离散性较大,特别是12%粉煤灰用量的曲线更差一些,但总的规律可以看出:(1)同等水泥剂量纯水泥稳定类结构的抗折强度低于水泥粉煤灰稳定类结构;(2)随粉煤灰掺量的增加,抗折强度降低,粉煤灰含量似不应高于10%。

表3 90 d 抗折强度试验结果汇总

结构类别	配合比 (C:F:S)	每块试件的抗折强度/MPa			抗折强度平均值/MPa
水泥稳定碎石	3:0:97	0.77	0.72	0.73	0.74
	4:0:96	1.49	1.52	1.76	1.57
	5:0:95	1.63	1.60	1.76	1.66
	6:0:94	2.40	2.13	2.00	2.18
	7:0:93	3.20	3.33	3.12	3.22
水泥粉煤灰稳定碎石	3:10:87	1.33	1.47	1.73	1.51
	4:10:86	2.40	2.33	2.24	2.32
	5:10:85	2.40	2.33	2.40	2.38
	6:10:84	2.67	3.40	3.47	3.18
	7:10:83	4.00	4.27	4.40	4.22
	3:12:85	2.13	1.87	2.00	2.00
	4:12:84	2.00	2.00	1.87	1.97
	5:12:83	2.45	2.40	2.80	2.55
	6:12:82	1.87	2.13	2.00	2.00
	7:12:81	2.67	2.40	2.47	2.51
	3:15:82	2.00	2.20	2.27	2.16
	4:15:81	1.73	1.87	1.93	1.84
	5:15:80	2.00	1.73	2.00	1.91
	6:15:79	2.27	2.35	2.37	2.33
	7:15:78	2.53	2.60	2.57	2.57

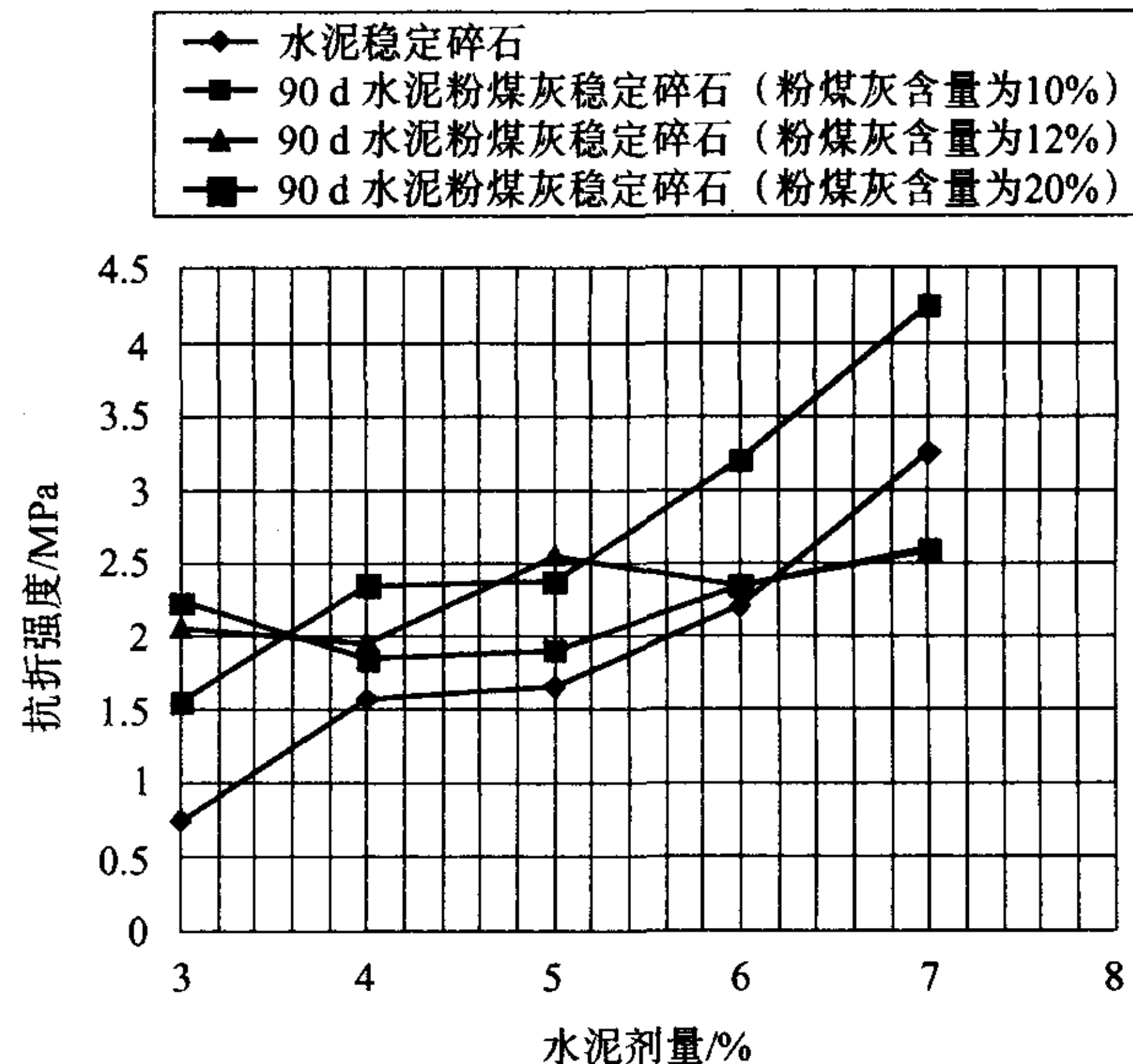


图2 水泥剂量与抗折强度的关系

这次试验的弯拉和劈裂强度数据和国内有关报导对比偏小,其原因可能是试验设备不很完备,试验经验较少,在试验环节上存在问题,使数据偏小,但能满足设计规范附录D2表“基层材料设计参数”中的技术指标。

#### 4.1.4 延迟成型时间对强度的影响

成型延迟时间强度汇总见表4,对强度的影响规律如图3所示。从试验结果看,水泥粉煤灰稳定碎石混合料强度降低速率不是很快:延迟2 h,强度未有损失;延迟8 h,强度损失22%;延迟24 h,强度才损失42%。而水泥稳定碎石混合料在此时间早已固结。因所做试件数量较少,虽不能完全证明,但基层规范附录有数据表明:水泥稳定碎石延迟2 h,强度就损失12%;水泥稳定天然砂砾延迟2 h,强度则损失22%。而规范规定,水泥稳定类结构施工延迟时间不应超过2~4 h。可见,加入粉煤灰,减缓了水泥稳定碎石混合料凝固时间。我们认为,水泥粉煤灰稳定碎石混合料延缓8 h成型,可以保证结构的强度。但由于不同材料有不尽相同的反应,具体到其他工程,还应先做试验再决定。但掺加粉煤灰后,延迟时间可以加长这一规律是肯定无疑的。

#### 4.2 室外试验成果

对3段试验路基层钻孔取芯,每一种结构钻取3块,芯样直径为 $\phi 100$  mm,长度用切割机截取100 mm,两端面以水泥浆抹平,待其硬化后浸水24 h进行抗压强度试验,试验结果见表5。



表 4 水泥粉煤灰碎石结构延迟时间试验结果

类别	配合比(C : F : S)	成型延迟时间 h	最佳含水量 %	最大干密度 g/cm <sup>3</sup>	7 d 无侧限抗压强度/MPa	强度保存百分比 $R_n/R_2$ ( $R_2$ 为延迟 2 h 的强度)
水泥粉煤灰稳定碎石	5 : 12 : 83	2	6.8	2.230	3.444	1.00
	5 : 12 : 83	6	6.8	2.230	2.738	0.80
	5 : 12 : 83	8	6.8	2.230	2.568	0.75
	5 : 12 : 83	10	6.8	2.230	2.451	0.71
	5 : 12 : 83	14	6.8	2.230	2.300	0.67
	5 : 12 : 83	24	6.8	2.230	1.982	0.58

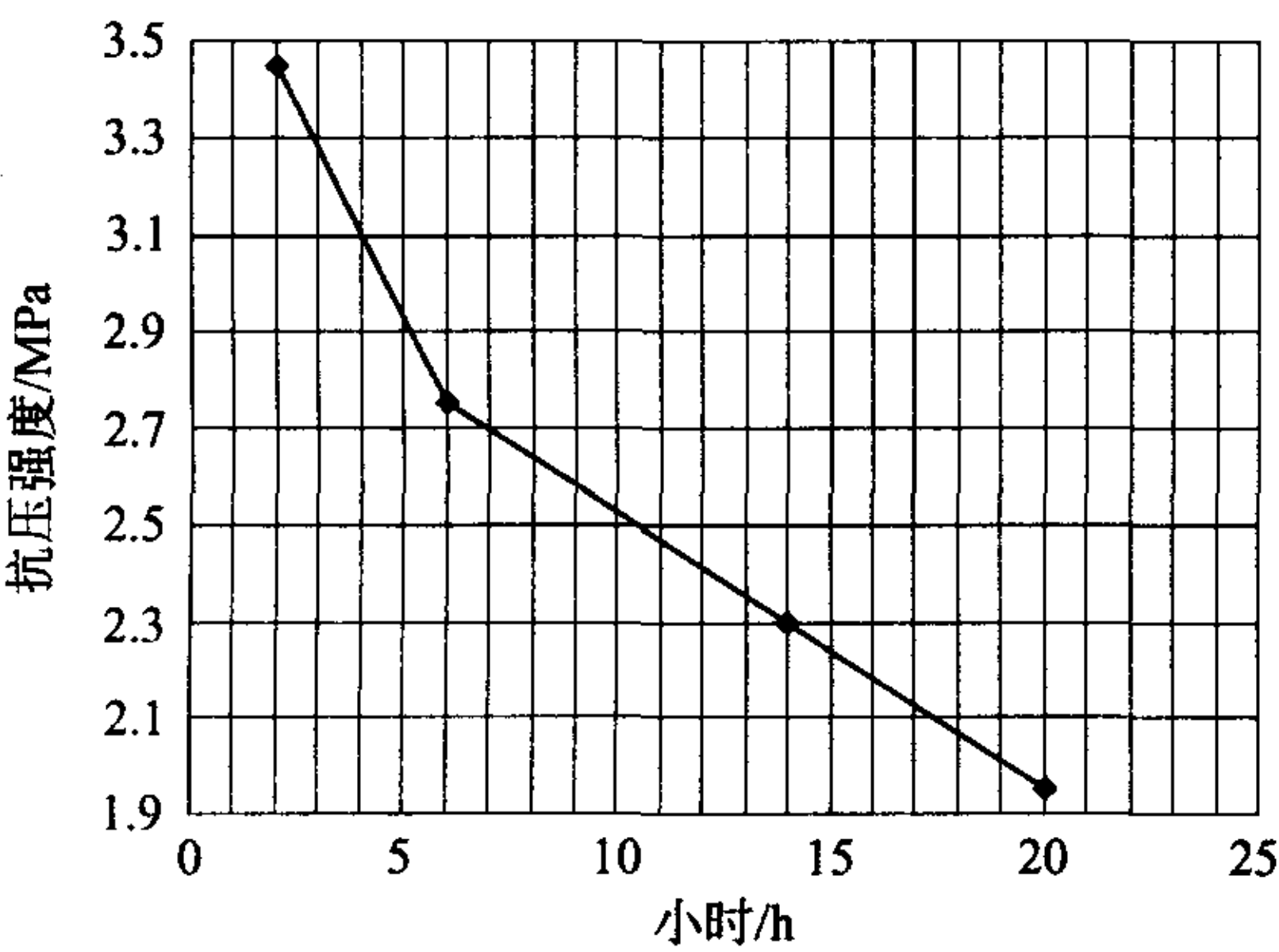


图 3 延迟时间试验

表 5 基层钻孔取芯抗压强度试验结果

代表路段	配合比 (C : F : S)	钻芯位置及强度值/MPa			平均值 MPa
K91+000 ~K97+500	7 : 0 : 93	K91+500	K94+000	K96+700	15.1
		19.1	13.1	13.1	
K97+500 ~K99+880	4 : 12 : 84	K98+700	K99+200	K99+700	15.3
		15.3	14.4	16.2	
K99+880 ~K107+620	4 : 10 : 86	K100+500	K103+400	K106+500	16.0
		15.3	16.0	16.8	

注:龄期为 15 个月。

从试件表面情况看,沥青混凝土面层与基层结合紧密,水泥粉煤灰稳定类结构试件更加密实,离析现象明显减少,颗粒分布更加均匀。从实测抗压强度结果看,虽然水泥剂量减少 3%,15 个月龄期水泥粉煤灰稳定类结构抗压强度却比纯水泥稳定类结构高 6%,且水泥粉煤灰稳定类结构强度均匀性要好得多。

5 成果总结

统观抗压、抗折及劈裂强度,除个别点外,当水泥用量相同时,水泥粉煤灰稳定类结构优于纯水泥稳定类结构,特别是后期强度更好一些。我们从室内

抗压强度增长情况看,龄期 180 d 比 7 d 强度,水泥稳定碎石增长 2.5~3.4 倍,而水泥粉煤灰稳定碎石结构增长了 3.5~4.5 倍;同龄期同剂量抗折强度,掺 10% 粉煤灰 1 组比水泥稳定碎石高 1.4 倍左右,其他 2 组也比水泥稳定碎石高 1.2 倍(个别点除外)。同龄期同剂量劈裂强度,粉煤灰掺量为 15% 这 1 组比水泥稳定碎石高 1.25~1.44 倍,其他 2 组也为其 1.05~1.1 倍。可见,掺粉煤灰类 3 种结构强度均占有很大优势。按设计规范附录,设计参数龄期规定为:水泥稳定粒料 3 个月,二灰类为 6 个月。现水泥粉煤灰类不应按纯水泥类推理,可否按二灰类,规范亦未提及,因而这是个需要商讨的问题。如果能按 6 个月考虑,则劈裂强度、抗折强度 2 项会更优于纯水泥类结构,在强度方面会有更大的优势。如按此次实验路 3 种配合比,则 4 : 10 : 86 (C : F : S) 的 1 组,可以相当于 7 : 93 (C : S),如多留些余地,至少也可替代 6 : 94 (C : S)。

通过大量的室内试验、试验路施工以及 1 年多的试验路使用情况观测,可以总结如下:

- (1)同等水泥剂量的水泥粉煤灰稳定类结构半年龄期抗压强度比水泥稳定碎石高 20%~30%,同等强度条件下,可减少水泥剂量 2%;
- (2)掺入适量(<10%)粉煤灰,不会影响原水泥稳定碎石结构早期强度(7 d),特别是当水泥剂量较小时,可大幅度提高早期强度。当粉煤灰掺量较大(>12%)时,其早期强度有所降低,但不会影响后期强度的发展,而且随着粉煤灰掺量增大(10%→15%),同等水泥剂量结构后期(180 d)抗压强度,呈增长趋势;
- (3)掺入粉煤灰后,水泥稳定碎石结构抗弯拉强度会明显提高(30%~40%),但掺量太大(>12%)会明显降低抗弯拉强度;
- (4)掺入粉煤灰,混合料的凝固时间有所增长,



有利于结构的施工,施工延迟时间可控制在 8 h 内完成,不会对结构强度造成大的影响;

(5)掺入粉煤灰,增加了结合剂总含量,从而增强了混合料拌和的均匀性,减少了离析,保证了结构的总体质量;

(6)掺入粉煤灰可减少混合料的空隙率,增强密实性,减少水分渗入对结构强度的影响,从而增强结构的抗冻性及耐久性;

(7)在不具备机械摊铺的条件下,该结构可采用平地机整平施工的作业方式(水泥稳定碎石则不能),不会对混合料均匀性及强度造成大的影响,该结构也适用于路拌法施工。

## 6 经济和社会效益分析

一种产品能否得到社会承认并广泛使用,一方面要看其技术是否先进,质量是否可靠;另一方面是其是否经济合理,能否为国家和社会创造财富。大量的试验数据证明:水泥粉煤灰稳定类结构具有早强、高强、抗冻、抗裂、耐久性好等特点,是一种优良的路面结构形式。水泥粉煤灰稳定碎石与水泥稳定碎石结构按强度等同的原则进行比较,可降低水泥用量 2%;加入粉煤灰同时减少了碎石集料的用量,而施工工艺及所用机具设备并无改变。所以,在粉煤灰合理运距的前提下,该结构具有较大的经济效益。

粉煤灰是火力发电厂产生的废料。我国地域辽阔,煤炭资源丰富,火力发电厂遍布全国各地,产生大量粉煤灰,既造成环境污染,又占用大量土地。水泥粉煤灰稳定类结构的研究,进一步扩大了粉煤灰的应用范围,对于我国经济发展中资源的综合利用具有十分重要的意义,可以变废为宝,减少环境污染,减少占地,具有显著的经济和社会效益。

## 7 建议

(1)对水泥粉煤灰稳定级配碎石配合比设计的

建议:

①水泥用量宜为  $4.5\% \pm 0.5\%$ ;

②粉煤灰用量宜  $< 10\%$ ;

③碎石用量宜  $> 85\%$ 。

因水泥粉煤灰稳定级配碎石后期强度较高,建议对其初期强度的要求降低一些,7 d 强度可略低于规范中对水泥稳定类结构的强度要求。

(2)从材料的实践应用来讲,干缩特性与抗拉强度是一对矛盾指标,在提高劈裂抗拉强度的同时,将增大干缩性,因此在应用中应慎重处理好二者的关系,视情况做到兼而有之。

(3)建议混合料采用间断级配,在增加粗集料的同时,相应增加细集料和粉料,使混合料形成密实骨架型结构,提高其抗压强度。

## 参考文献:

- [1] JTJ 034—2000,公路路面基层施工技术规范[S].
- [2] JTJ 058—2000,公路工程集料试验规程[S].
- [3] JTJ 051—93,公路土工试验规程[S].
- [4] 长安大学.半刚性基层材料温度收缩试验方法[Z].
- [5] 长安大学.半刚性基层材料干燥收缩试验方法[Z].
- [6] JTJ 053—94,公路工程水泥混凝土试验规程[S].
- [7] JTJ 054—94,公路工程石料试验规程[S].
- [8] JTJ 057—94,公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S].
- [9] JTJ 014—97,公路沥青路面设计规[S].
- [10] 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,1999.
- [11] 刘秉京.混凝土技术[M].人民交通出版社,2003.
- [12] 张北瑞.粉煤灰—水泥稳定碎石基层力学特性的试验研究[J].石家庄铁道学院学报,1998,(12).
- [13] 萧赓.水泥粉煤灰级配碎石基层混合物的路用性能研究[J].重庆交通学院学报,2001.
- [14] 杨有海,梁波,丁立.粉煤灰与石灰、水泥拌和料的强度特性试验研究[J].岩土工程学报,2000,23(2).