

文章编号:1671-8879(2007)02-0001-05

二灰稳定集料抗裂性能评价与应用

李炜光, 申爱琴, 张玉斌

(长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘要: 针对现行技术标准缺乏半刚性材料的抗裂级配以及收缩评价指标的现状, 根据限制最小粒径 k 法确定二灰碎石集料级配, 通过振动试验、均匀设计法逐级振动试验及灰色系统理论, 分析并确定了二灰砂砾集料级配; 应用室内研究成果, 在河南、陕西、河北三省铺筑了 6 条相关的试验路, 并进行了长期跟踪调查。工程实践表明, 研究推荐的二灰碎石、二灰砂砾方案具有后期强度增长快、抗裂性能优良的特点, 并经受住了超重载、大交通量试验路段验证。结果表明: 对二灰砂砾、二灰碎石采用不同抗裂级配设计方法是可行的; 推荐的二灰稳定材料抗裂性能评价指标——开裂系数能反映此类材料的抗裂性能。

关键词: 道路工程; 二灰稳定集料; 抗裂性能; 试验路

中图分类号: U414.11 **文献标志码:** A

Anti-cracking capability of lime-fly-ash-stabilized-aggregate in road base

LI Wei-guang, SHEN Ai-qin, ZHANG Yu-bin

(Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education,
Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: Aimed at the actuality that the lack of suitable grade on anti-cracking-grade, and judgment-index on anti-performance of criterion for semi-rigid material, the plan of lime-fly-ash-stabilized stone is designed by the way of limiting the minimum diameter of aggregate, by the way of vibrate, hand-over-design method, and grey-system-theory, the lime-fly-ash gravel is designed. Six test-roads were built in Henan, Shaanxi, Hebei provinces, so did the track-survey on them for a long time. The track-results show that the summing plan of lime-fly-ash-stabilized-aggregate is higher in strength-increase, better in anti-cracking performance, and acted well in over-load and heavy-traffic road. Anti-cracking coefficients can be used in the judge of anti-cracking for semi-rigid material. 9 tabs, 10 refs.

Key words: road engineering; lime-fly-ash-stabilized-aggregate; anti-cracking performance; test-road

0 引言

修筑在半刚性基层上的沥青路面在行车荷载、自然因素作用下, 会逐渐出现各种病害。在各种路面病

害中, 早期裂缝最为普遍, 其因是基层抗裂性能变差所致, 而早期裂缝的产生及发展又会影响到路面的正常使用^[1]。因此, 如何提高半刚性材料的抗裂性能, 减少、延缓路面开裂是保证公路正常使用的一个大问

题^[2]。现有研究表明,半刚性基层的温缩、干缩性能差是导致开裂的主要原因,但文献[1]³⁰中并没有相应收缩性能评价指标,以及具有最佳抗裂性能的二灰稳定材料,因而在应用中无法进行抗裂性能评价,这也在一定程度上限制了半刚性材料的使用^[3-4]。本文通过室内研究,分别采用限制最小粒径的 k 法以及均匀设计法,设计了二灰碎石、二灰砂砾研究方案,采用抗裂评价指标——开裂系数 S 对设计方案进行了抗裂性能评价,并在陕西、河北、河南三省铺筑的3条二灰碎石和3条二灰砂砾试验路上进行了验证^[5]。

1 室内研究方案

1.1 二灰碎石研究方案的确定

现有研究成果表明,细集料质量分数多是导致半刚性材料抗裂性能差的一个重要原因^[6]。因此,本项研究中采用了前苏联控制筛余物递减系数 k 的方法。该方法是以颗粒直径 $1/2$ 为递减标准,关键是确定 k 值以及控制最小粒径,简称为 k 法^[7],最小控制粒径取2.36 mm、4.75 mm时的方案依次为I-1、I-2,对应文献[1]³⁵级配方案IV,据此确定的二灰碎石试验方案见表1。

表1 二灰碎石试验方案矿料级配通过率 %

筛孔尺寸/mm	二灰碎石方案编号		
	I-1	I-2	IV
31.50	95~100	95~100	
26.50	81~90	80~87	
19.00	53~71	50~65	81~98
13.20	31~54	29~45	
9.50	21~41	16~28	52~70
4.75	7~17	0~10	30~50
2.36	0~10		18~38
1.18	10~27		
0.60	6~20		
0.075	0~7		

1.2 二灰砂砾研究方案的确定

对砂砾的调查发现,不同河流砂砾中均含有一定的细集料^[2],同时考虑到施工中振动压实机械使用的普及,因此采用逐级振动试验对砂砾级配进行了研究。在此基础上还通过均匀设计法振动试验,研究分析了各组成粒径质量分数与骨架结构的关系,运用灰色系统理论并结合国内外的研究成果,提出确保砂砾骨架结构的3个控制筛孔19 mm、4.75 mm及0.075 mm,在此基础上得到了砂砾组成级配,如表2所示。

表2 设计二灰砂砾级配通过率 %

筛孔尺寸/mm	二灰砂砾方案编号	
	设计级配 K-8	规范级配 K-4
37.50	100	100
31.50	65~85	85~100
19.00	50~70	65~85
9.50	33~53	50~70
4.75	20~40	35~55
2.36	15~35	25~45
1.18	7~27	17~35
0.60	1~21	10~27
0.075	0~10	0~15

注:规范级配指文献[1]中的级配K-4。

设计级配中大于9.5 mm的颗粒以及小于2.36 mm的颗粒分布具有连续特点,而2.36~4.75 mm颗粒质量分数较少,总体上属于连续级配,局部(中间粒径)有折断级配的特点。设计级配整体上较文献[1]³⁵级配偏粗一些,可提高二灰砂砾的抗冲刷及抗裂性能。3个主要控制粒径19 mm、4.75 mm、0.075 mm的通过率分别为60%、30%、5%。

2 强度增长率

半刚性材料强度增长特点是早期强度低、后期强度高,而早期强度高并不意味着后期强度高、使用效果好^[8],相反,可能会因过分强调早期强度,导致早期产生开裂。因此为评价强度增长能力,测试了在不同龄期时二灰碎石、二灰砂砾强度,并提出采用7、28、90、180 d 4个龄期强度回归直线斜率作为强度增长率^[9-10](时间采用对数坐标,强度为常数坐标,此时回归直线相关系数最大),结果如表3所示。

表3 二灰稳定材料试验方案强度汇总表

二灰碎石 方案编号	不同龄期强度/MPa				强度增长	相关系数
	7 d	28 d	90 d	180 d		
I-1	1.32	3.28	8.01	10.25	6.525	0.955
I-2	1.35	3.41	7.98	9.82	6.239	0.963
IV	1.38	2.66	7.09	9.04	5.651	0.932

二灰砂砾 方案编号	不同龄期强度/MPa				强度增长	相关系数
	7 d	28 d	90 d	180 d		
K-8	0.74	1.67	2.20	9.35	6.479	0.914
K-4	1.04	2.17	2.45	6.85	3.848	0.908

表3数据表明,对比7 d强度,可以发现,IV最高,而I-1最低;但到28 d时,I-1强度已超过IV。从7~180 d强度增长看,与7 d强度的判定结论相反,I-1最大,IV最低。表明粗集料骨架结构的形成提高了二灰碎石强度增长能力。

对二灰砂砾,虽然设计方案(K-8)早期强度远

低于文献[1]⁴⁰方案(K-4),但是到 28 d 时,两者强度已基本持平;到 180 d 时,设计方案强度甚至超出文献[1]⁴⁰方案的 36.5%。表明基于同样设计思路设计的二灰砂砾强度增长率也有较大提高。

对比二灰砂砾设计方案(K-8)及二灰碎石方案文献[1]³⁵ IV,可以发现,前者通过骨架结构的形成,到 180 d 时,二灰砂砾 K-8 的强度(9.35 MPa)超过了二灰碎石 IV 的强度(9.04 MPa)。

对比二灰碎石、二灰砂砾不同龄期强度测试结果,可以发现,骨架结构的形成提高了两类材料的强度增长潜力,考虑到实际应用时交通量也是逐年递增的,因此对半刚性材料的强度控制应以早期强度是否满足最低要求、后期强度增长是否最高来评价。

3 抗裂性能评价

3.1 干燥收缩评价指标

评价中所采用的公式

$$S_d = n\Delta w / \beta_d, \alpha_d = (\Delta L_0 / L) / \Delta w$$

$$\beta_d = \epsilon_{\max} / \alpha_d, \epsilon_{\max} = C / E$$

式中: S_d 为干缩开裂系数; n 为施工不均匀系数($n \geq 1$,由施工质量决定,施工质量越高, n 值越小); Δw 为材料的最大失水率(施工摊铺以及养护过程中,基层材料的最大失水率,以下为讨论方便,并结合室内试验结果,对于二灰碎石、砂砾 Δw 统一取 8%); β_d 为干缩抗裂系数; ϵ_{\max} 为计算极限拉应变(10^{-6}); α_d 为平均干缩系数; C 为材料的抗弯拉强度(MPa); E 为抗弯拉回弹模量(MPa)。

二灰稳定集料干缩开裂数据如表 4 所示。

表 4 二灰稳定集料干缩开裂指标

指 标	I-1	I-2	IV	K-4	K-8
抗弯拉强度 C/MPa	0.950	0.890	0.980	0.962	0.845
抗弯拉回弹模量 E/MPa	5 567	6 049	7 831	5 160	4 065
计算极限拉应变 $\epsilon_{\max}/10^{-6}$	170.65	147.13	125.14	186.43	207.80
平均干缩系数 $\alpha_d/10^{-6}$	16.94	16.58	24.25	24.04	20.84
干缩抗裂系数 β_d	10.07	8.87	5.16	7.76	9.97
材料最大失水率 $\Delta w/\%$	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0
施工不均匀系数 n	1	1	1	1	1
干缩开裂系数 S_d	0.79	0.90	1.55	1.03	0.80

计算结果表明,最小粒径的限制,减少了集料总表面积,失水导致的干燥收缩也因此减少,干缩开裂指标也随之降低。但是最小控制粒径的加大,如 I-1(控制 2.36 mm)与 I-2(控制 4.75 mm),会由于弯拉强度的降低,减少了极限拉应变,导致开裂指标的增

加。因此,最小控制粒径不宜过大,2.36 mm 控制的方案 I-1 干缩抗裂性能最佳。

与二灰碎石(方案 I-1,小于 2.36 mm,质量分数为 5%)相比较,振动法确定的二灰砂砾,由于仍含有相当的细集料(小于 2.36 mm,质量分数为 30%),因此干缩开裂指标降低不太明显。

3.2 温度收缩评价指标

计算公式如下,试验结果见表 5。

$$S_T = \Delta T / \beta_T, \beta_T = \epsilon_{\max} / \alpha_T, \epsilon_{\max} = C / E$$

式中: S_T 为温缩开裂系数; ΔT 为施工季节最大温差,指施工中昼夜最大温差(表 5 中水泥碎石、二灰碎石均以 15℃ 为例); β_T 为温缩抗裂系数; α_T 为材料的平均温缩系数;其余符号同前。

表 5 二灰碎石温缩抗裂系数汇总

指 标	I-1	I-2	IV	K-8	K-4
抗弯拉强度 C/MPa	0.950	0.890	0.980	0.845	0.962
抗弯拉回弹模量 E/MPa	5 567	6 049	7 831	4 065	5 160
计算极限拉应变 $\epsilon_{\max}/10^{-6}$	170.65	147.13	125.14	207.8	186.43
平均温缩系数 $\alpha_T/10^{-6}$	21.80	20.84	24.25	25.00	32.00
温缩抗裂系数 β_T	7.83	7.06	5.16	8.31	5.83
最大温差 $\Delta T/^\circ\text{C}$	15	15	15	15	15
温缩开裂系数 S_T	1.91	2.12	2.91	1.81	2.57

由表 5 可看出,缺少细集料的二灰碎石平均温缩开裂系数比 IV 方案有较明显降低。对于设计的二灰碎石方案,最小控制粒径过大(如 I-2),由于弯拉强度值的降低,极限拉应变的减少,开裂指标有所增加。因此,最小控制粒径 2.36 mm 的 I-1 二灰碎石方案的温缩抗裂性能最佳。

结合干缩以及温缩评价结果,可以发现 k 法确定的二灰碎石的干缩抗裂性能最佳;振动法确定的二灰砂砾的温缩抗裂性能最优。

4 二灰碎石试验路段

4.1 二灰碎石试验路段

1999 年 7 月到 2002 年 4 月,先后在 3 条公路上铺筑二灰碎石试验路段,试验路段相关数据如表 6 所示,裂缝率统计如表 7 所示。

4.2 二灰碎石试验路段简介

(1)邯郸—临清公路是晋煤外运的一条通道,运煤车辆多,破坏严重,原有邯郸—临清路况调查,路面状况指数为 22.9,路面破损率为 53.1%^[3]。铺筑试验路段所用石灰为武安产钙质灰,有效钙镁质量分数为 56.95%;邯郸电厂粉煤灰,烧失量为 19.1%,

表 6 设计二灰碎石试验路段指标汇总

试验路段名称		邯郸—临清	309 国道武安—涉县	陕西省道 107 环山线
公路等级		二级	二级	二级
原设计路面结构形式	上面层	AC-13 I (3 cm)	AK-16A(4 cm)	AC-13 I (4 cm)
	下面层	AC-25 II (5 cm)	AC-25 I (5 cm)	AC-20 I (4 cm)
	上基层	二灰碎石 18 cm	水泥碎石(18 cm)	水泥碎石(18 cm)
	下基层	二灰碎石 18 cm	二灰碎石(18 cm)	二灰碎石(18 cm)
	底基层		二灰土(18 cm)	二灰土(18 cm)
集料级配		上基层	I -1	I -1
		下基层	I -2	I -2
		底基层		
试验段铺筑时间		1999 年 7~8 月	2001 年 7 月	2002 年 4~5 月
试验段使用时间/a		5.0	2.5	2.0
使用效果		良好	良好	良好

表 7 二灰碎石试验路段裂缝率统计汇总

试验路段名称	邯郸—临清	309 国道武安—涉县	陕西省道 107 环山线
面层厚度/cm	8	9	8
试验段铺筑时间	1999 年 7~8 月	2001 年 7 月	2002 年 4~5 月
横缝率 (2001 年观测) /(条·段 ⁻¹)	无(2 a)		
横缝率 (2002 年 7 月观测) /(条·段 ⁻¹)	无(3 a)	无(1 a)	
横缝率 (2003 年观测) /(条·段 ⁻¹)			无(1 a)
横缝率 (2004 年观测) /(条·段 ⁻¹)	无(5 a)	无(2.5 a)	无(2 a)

注:由于试验路段长度不一致,另外对试验路段的观测时主要以是否产生横向裂缝进行统计,因此对典型的路面面层病害并没有进行统计;无(2 a)指铺筑 2 a 后横缝率观测结果为 0,其他与此类同。

0.045 mm 筛余为 10%,氧化硅、氧化铝和氧化铁的质量分数为 72.99%;石料压碎值为 24%,针片状质量分数为 18.9%。

试验路段填土高度为 0.5~1.5 m,施工为机拌机铺,压实度均满足 98%的要求。试验路段于 1999 年交付使用,开放交通,2004 年 1 月对现场试验路段进行观测,经过约 5 a 的使用,试验路段使用状况良好。

(2)309 国道武安—涉县路段,是晋煤外运的主通道,运煤车辆多,超载现象极为严重;该区还有几个大型铁矿;此外,该区为山岭重丘区,原 309 国道武安—涉县段路面完全破坏。设计基层材料为水泥碎石,为验证设计二灰碎石方案的强度能否满足超重载路段要求,铺筑了相关试验路段。

试验路段在旧路基上铺筑,施工为机拌机铺,压

实度均满足 98%的要求。试验路段于 2001 年年底开放交通,2004 年 2 月对现场试验路进行观测,经过 2.5 a 的使用,试验路段未出现横向裂缝。

(3)陕西省道 107 环山线是一条旅游公路。铺筑材料中石灰为富平庄里一级钙质灰,户县电厂粉煤灰,烧失量为 4.4%,0.045 mm 筛余为 12%,氧化硅、氧化铝和氧化铁质量分数为 74.01%;石料压碎值为 17.9%,针片状质量分数为 12.8%。

试验路段填土高度为 0.5~4 m,施工为机拌机铺,压实度均满足 97%的要求。试验路段于 2002 年年底开放交通,2004 年 4 月对现场试验路进行观测,经过近 2 a 的使用,试验路段未出现横向裂缝。

4.3 二灰碎石试验路段验证结果

通过限制最小粒径 *k* 法确定的二灰碎石,在交通量很大的邯郸—临清路段的 5 a 成功使用,表明完全缺少细集料的二灰碎石层底弯拉应力能够满足大交通量需求,且能在较长时间内保持良好的使用性能,疲劳性能好。而在超载、重交通的武安—涉县路段的 2 a 多成功使用表明,设计的二灰碎石后期强度能够满足行车荷载需求,并且有足够高的层底弯拉应力值,能够用于重载路段的修筑。

5 二灰砂砾试验路段

5.1 二灰砂砾试验路段

2002 年 4 月~2003 年 4 月,先后在 3 条公路上铺筑了二灰砂砾试验路,3 条试验路段的相关数据如表 8 所示,观察裂缝率统计如表 9 所示。

表 8 设计二灰砂砾试验路段指标汇总

试验路名称		平顶山市 南坡王—石南线	平顶山市 庙坡头—洪井线	陕西省道 107 环山线
公路等级		二级	二级	二级
原设计路面结构形式	上面层	AC-13 I (3 cm)	AC-13 I (4 cm)	AC-20 I (4 cm)
	下面层	AC-20 I (4 cm)	AC-20 I (4 cm)	AC-13 I (4 cm)
	上基层	水泥砂砾(18 cm)	水泥砂砾(18 cm)	水泥碎石(18 cm)
	下基层	二灰砂砾(18 cm)	二灰砂砾(18 cm)	二灰碎石(18 cm)
	底基层			二灰土(18 cm)
集料级配		上基层	I -1	I -1
		下基层	I -1	I -1
		底基层		
试验段长度/m		193	300	120
试验段铺筑时间		2002 年 10 月	2003 年 4 月	2002 年 4~5 月
试验段使用时间/a		1	1	2
使用效果		整体使用状况良好,局部有开裂及路表面有跑飞现象	良好	良好

表 9 二灰砂砾试验路段裂缝统计率汇总

试验路名称	平顶山市	平顶山市	陕西省道
	南坡王—石南线	庙坡头—洪井线	107 环山线
面层厚度/cm	7	8	8
试验段铺筑时间	2002 年 10 月	2003 年 4 月	2002 年 4~5 月
横缝率 (2004 年观测) /(条·段 ⁻¹)	无(2 a)	无(1 a)	无(2 a)

5.2 二灰砂砾试验路段简介

(1)河南平顶山市南坡王—石南线试验路段属改建二级公路,运煤车辆多,为验证二灰砂砾能否承受重荷载以及早期强度是否能满足开放交通的要求,铺筑了该试验路段。施工中采用半幅施工、半幅通车,交替进行,试验路段在铺筑过程中,除 2002 年 11 月 2 日温度在 6℃~16℃,且风比较大外,其他几天的气温都在 4℃~7℃之间,多以阴天和风速较大天气为主,修筑完工后气温一直较低,同时,2002 年该区降雪多于往年,气温偏低。

试验路段在旧路基上铺筑,施工为机拌机铺,压实度均满足 97%的要求。2003 年 4 月首次观测试验路段时发现,经过一个冬天的使用,试验路段整体性能良好,但是局部存在下封处理不当,路表面有跑飞现象,但表面无裂缝。

(2)为了在不同地区验证室内设计砂砾级配,在河南省道平顶山市庙坡头—洪井线铺筑了设计方案试验路段,石灰为当地刘村一级镁质灰,粉煤灰为坑口电厂三级灰,砂砾为郟县汝河天然砂砾。

试验路段使用不到 1 a 后发现,原设计的(水泥砂砾)路段出现较多开裂,而二灰砂砾设计路段使用良好。由此表明,虽然二灰砂砾早期强度较低,但是通过掺配得到设计方案抗裂性能优于水泥稳定砂砾。

(3)陕西省道 107 环山线属于旅游公路,设计二灰砂砾段经过近 2 a 的使用,性能良好;与之相比采用天然级配二灰砂砾出现了一些开裂,表明掺配得到设计方案抗裂性能有较明显地提高。

5.3 二灰砂砾试验路段验证结果

由于天然砂砾中含有细集料,考虑到振实碾压机械的普及,采用振动法确定了二灰砂砾级配,实践证明,通过掺配得到的二灰砂砾可以用于高等级公路基层,且抗裂性能得到提高。二灰砂砾试验路段铺筑时间较短,使用效果仍需跟踪调查。

6 结 语

(1)经过数条试验路段的多年验证,认为对二灰

碎石采用限制最小粒径 k 法,对二灰砂砾采用振动法确定的二灰稳定材料整体使用性能良好,抗裂性能有明显提高。

(2)虽然 I-1、I-2 二灰碎石中缺少了细集料,但是武安—涉县、邯郸—临清试验路段的成功铺筑,表明其层底弯拉强度、疲劳性能均能够满足重交通荷载要求。室内试验研究结果也表明,该方案具有后期强度增长快、抗裂性能好的优点。

(3)通过振动法确定的二灰砂砾集料级配,同样具有后期强度增长快、抗裂性能改善的优点。

(4)用开裂系数 S 评价二灰类材料的抗裂性能,将材料的极限弯拉应变、温缩(干缩)、最大失水率、最大温差等因素综合考虑,使评价更为完善合理。

参考文献:

References:

[1] JTJ 034-2000,公路路面基层施工技术规范[S].

[2] 蒋新明. 二灰碎石抗裂性的研究[J]. 中国公路学报, 2002,15(3):28-32.

JIANG Xin-ming. Study of crack resistance of lime-flyash-macadam mixture[J]. China Journal of Highway and Transport, 2002, 15(3): 28-32.

[3] 申爱琴,李炜光,蒋庆华. 二灰砂砾基层综合路用性能及配比设计[R]. 西安:长安大学,2004.

[4] 李炜光. 沥青路面半刚性基层抗裂性能研究[D]. 西安:长安大学,2002.

[5] 申爱琴. 沥青路面抗裂性能研究[R]. 西安:长安大学,2004.

[6] 郑南翔. 半刚性基层材料抗裂性能研究[D]. 西安:长安大学,1988.

[7] 林绣贤. 柔性路面结构设计方法[M]. 北京:人民交通出版社,1988.

[8] 滕旭秋,陈忠达,蒋万民. 二灰碎石混合料配合比设计方法[J]. 长安大学学报:自然科学版,2006,26(1):29-34.

TENG Xu-qiu, CHEN Zhong-da, JIANG Wan-min. Mix ratio design of lime-fly-ash stabilized-aggregates-mixtures[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(1): 29-34.

[9] 张玉斌. 二灰砂砾基层综合路用性能及配比研究[D]. 西安:长安大学,2004.

[10] 滕旭秋,陈忠达. 二灰砂浆配合比设计方法[J]. 长安大学学报:自然科学版,2005,25(3):37-40.

TENG Xu-qiu, CHEN Zhong-da. Mixture design method for lime-fly ash mortar [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005, 25(3): 37-40.