

文章编号: 0451-0712(2006)05-0179-05

中图分类号: U414.16

文献标识码: B

# 二灰类材料抗裂性能研究

平树江<sup>1</sup>, 李炜光<sup>2</sup>

(1. 山东省滨州市公路管理局 滨州市 256614; 2. 长安大学教育部特殊地区公路工程重点实验室)

**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二灰砂砾集料级配, 针对室内研究成果, 在河南省、陕西省和河北省铺筑了 6 条相关试验路, 并进行了长期跟踪调查。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:** 二灰稳定类材料; 抗裂性能; 限制最小粒径方法; 开裂系数

修筑在半刚性基层上的沥青混凝土路面在行车荷载、自然因素作用下, 使用 2~3 年会逐渐出现各种病害, 其中早期裂缝最为普遍, 相当一部分的开裂是由于基层抗裂性能差产生的反射裂缝所致, 而早期裂缝的产生及发展又会影响到路面的正常使用<sup>[1]</sup>。因此, 如何提高半刚性材料的抗裂性能, 减少、延缓开裂是保证公路正常使用的一个大问题。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, 但规范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<sup>[1,2]</sup>。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及二灰砂砾研究方案, 使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, 并分别在陕西省、河北省和河南省铺筑了 3 条二

灰碎石以及 3 条二灰砂砾试验路, 验证了室内研究成果<sup>[1~3]</sup>。

## 1 室内研究方案的确定

### 1.1 二灰碎石研究方案的确定

现有级配理论多采用 W. B. 富勒(Fuller)的最大密度曲线理论以及 A. N. 泰波(Talbol) $n$  幂公式, 但是二者均不能控制集料最小粒径, 而现有研究成果表明, 细集料含量多是导致半刚性材料抗裂性能差的一个重要原因<sup>[1,4]</sup>。因此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<sup>[5]</sup>, 最小控制粒径分别取为 2.36 mm、4.75 mm 时的方案依次为 I-1、I-2, 对应规范级配方案为 IV, 据此确定的二灰碎石试验方案见表 1 所示。

表 1 二灰碎石试验方案矿料级配汇总

二灰碎石 方案代号	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%									
	31.5	26.5	19.0	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.075
I-1	95~100	81~90	53~71	31~54	21~41	7~17	0~10			
I-2	95~100	80~87	50~65	29~45	16~28	0~10				
IV	100		81~98		52~70	30~50	18~38	10~27	6~20	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<sup>[2]</sup>,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、分析了各组成粒径含量与骨架结构的关系,运用灰色系统理论并结合国内外以往研究成果,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,见表2所示。

表2 设计二灰砂砾级配

二灰砂砾 方案代号	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%								
	37.5	31.5	19	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.075
设计级配k-8	100	65~85	50~70	33~53	20~40	15~35	7~27	1~21	0~10
规范级配k-4	100	85~100	65~85	50~70	35~55	25~45	17~35	10~27	0~15

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含量较少,总体上属于连续级配,局部(中间粒径)有间断级配的特点。设计级配整体上较规范级配偏粗一些,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与0.075 mm的通过率分别是60%、30%和5%。

## 2 强度增长率研究

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<sup>[2]</sup>,相反可能会因过分强调早期强度,导致早期产生开裂<sup>[1]</sup>。因此为评价强度增长能力,测试了在不同龄期时,二灰碎石和二灰砂砾强度,并提出采用7 d、28 d、90 d、180 d 4个龄期强度回归直线斜率作为强度增长率(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),结果见表3所示。

表3 二灰稳定类材料试验方案强度汇总

二灰碎石 方案代号	不同龄期强度/MPa				强度 增长率	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 方案代号	不同龄期强度/MPa				强度 增长率	相关 系数
	7 d	14 d	28 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强度增长率看,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)早期强度远低于规范方案(k-4),但是到28 d,两者强度已基本持平;到180 d时,设计方案强度甚至超出规范方案的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)及二灰碎石规范方案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)。

对比二灰碎石和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和后期强度增长是否最高来评价。

## 3 抗裂性能评价

在本研究中建议采用开裂系数S作为开裂评价指标,考虑到收缩开裂影响因素的2个主要方面:干燥收缩以及温度收缩,因此在下面分别进行讨论。

(1)干燥收缩评价指标<sup>[1]</sup>。

评价中采用如下公式:

$$S_d = n\Delta\omega/\beta_d \quad (1)$$

$$\alpha_d = (\Delta L_0/L)/\Delta\omega \quad (2)$$

$$\beta_d = \epsilon_{\max}/\alpha_d \quad (3)$$

$$\epsilon_{\max} = S/E \quad (4)$$

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,该指标的设置主要考虑的是在实际施工中产生的粒料离析程度、碾压是否充分、养生是否到位等因素对 $S_d$ 的影响。可由施工单位对施工质量的自检确定。



以下为讨论方便,均取为 1.0); $\Delta\omega$  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、砂砾统一取 8%); $\beta_d$  为干缩抗裂系数; $\epsilon_{\max}$  为计算极限拉应变( $10^{-6}$ ); $\alpha_d$  为材料的干缩系数; $S$  为材料的抗弯拉强度,MPa; $E$  为抗弯拉回弹模量,MPa。

二灰碎石(砂砾)干缩开裂数据见表 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
弯拉强度 $S/\text{MPa}$	0.95	0.89	0.98	0.962	0.845
弯拉模量 $E/\text{MPa}$	5 567	6 049	7 831	5 160	4 065
极限拉应变 $\epsilon_{\max}(\times 10^{-6})$	170.65	147.13	125.14	186.43	207.8
平均干缩系数 $\alpha_d(\times 10^{-6})$	16.94	16.58	24.25	24.04	20.84
干缩抗裂系数 $\beta_d$	10.07	8.87	5.16	7.76	9.97
最大失水率 $\Delta\omega/\%$	8	8	8	8.0	8.0
不均匀系数 $n$	1	1	1	1	1
干缩开裂指标 $S_d$	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,按照 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 的含量为 5%)相比,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 的含量为 30%),因此干缩开裂指标降低不太明显。

(2) 温缩评价指标<sup>[1]</sup>。

计算公式如下,据此计算的温缩试验结果见表 5 所示。

$$S_T = \Delta T / \beta_T \quad (5)$$

$$\beta_T = \epsilon_{\max} / \alpha_T \quad (6)$$

$$\epsilon_{\max} = S / E \quad (7)$$

式中:  $S_T$  为材料抗开裂温缩评价指标; $\Delta T$  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); $\beta_T$  为温缩抗裂系数; $\alpha_T$  为材料的平均温缩系数;其余符号同前。

表 5 计算结果表明,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。对设计二

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。

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
弯拉强度 $S/\text{MPa}$	0.95	0.89	0.98	0.845	0.962
弯拉模量 $E/\text{MPa}$	5 567	6 049	7 831	4 065	5 160
计算极限拉应变 $\epsilon_{\max}(\times 10^{-6})$	170.65	147.13	125.14	207.8	186.43
平均温缩系数 $\alpha_T(\times 10^{-6})$	21.8	20.84	24.25	25.00	32.00
温缩抗裂系数 $\beta_T$	7.83	7.06	5.16	8.31	5.83
最大温差/℃	15	15	15	15	15
温缩开裂指标 $S_T$	1.91	2.12	2.91	1.81	2.57

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,干缩抗裂性能最佳;振动法确定的二灰砂砾,温缩抗裂性能最优。

## 4 二灰碎石试验路

### 4.1 二灰碎石试验路段综述

为验证室内研究结果,从 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,试验路相关数据见表 6 所示,裂缝率统计见表 7 所示。

表 6 设计二灰碎石试验路指标汇总

试验路名称	邯郸—临清	309 国道武安—涉县段	陕西省道 107 环山线
公路等级	二级	二级	二级
试验路组合形式	I-1、 I-2(18 cm)	I-1、I-2(36 cm) + 二灰土(18 cm)	I-1
试验段代号及长度	I-1(500 m) I-2(500 m)	I-1(150 m) I-2(150 m)	XS-8(120 m)
试验段铺筑时间	1999 年 7 月~8 月	2001 年 7 月	2002 年 4 月~5 月
试验段使用时间	5 年	2.5 年	2 年
使用效果	良好	良好	良好

### 4.2 二灰碎石试验路简介

(1) 邯郸—临清二级公路,是晋煤外运的一条通道,运煤车辆多、轴载大、破坏严重,原有邯—临线路况调查老路面状况指数(PCI)值为 22.9,老路面破损率(DR)值为 53.1<sup>[3]</sup>。铺筑试验路所用石灰为武安产钙质灰,有效钙镁含量为 56.95%;邯郸电厂粉煤灰,烧失量为 19.1%,0.045 mm 筛余为 10%,氧化硅



表7 二灰碎石试验路裂缝统计率汇总

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

注:由于试验段长度不一致,另外对试验段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。

和氧化铝以及氧化铁含量为72.99%;石料压碎值为24%,针片状含量为18.9%。

试验段填土高度为0.5~1.5 m 之间,施工为机拌机铺,压实度均满足98%的要求。试验路于1999 年交付使用,开放交通。2004 年1 月对于现场试验路进行观测,经过近5 年的使用,状况良好。

(2)309 国道武安—涉县段,是晋煤外运的主通道,运煤车辆多、超载现象极为严重,由于该区有几个大型铁矿,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路段要求,铺筑相关试验路。

试验段在旧路基上铺筑,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 年的使用,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,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%,氧化硅和氧化铝以及氧化铁含量为74.01%;石料压碎值为17.9%,针片状含量为12.8%。

试验段填土高度在0.5~4 m,施工为机拌机铺,压实度均满足97%的要求。试验路于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 年的使用,试验路段未出现横向裂缝。

#### 4.3 二灰碎石试验段小结

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—临清路的5 年成功使用,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使用性能和疲劳性能。而在超载、重交通的武安—涉线路段的2 年多成功使用表明设计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。西安试验路由于铺筑时间较短,仍需观察。

## 5 二灰砂砾试验路

### 5.1 二灰砂砾试验路段综述

为验证室内研究结果,从2002 年4 月到2003 年4 月,先后在3 条公路上铺筑二灰砂砾试验路,3 条试验路相关数据见表8 所示,观察裂缝率统计见表9 所示。

表8 设计二灰砂砾试验路指标汇总

试验路名称	平顶 山南—石线	平顶 山庙—洪线	陕西省道 107 环山线
公路等级	二级	二级	二级
试验路组合形式	二灰砂砾 (18 cm)+二灰 砂砾(18 cm)	二灰砂砾 (18 cm)+二灰 砂砾(18 cm)	XS-8 二灰 砂砾(18 cm)+ 二灰土(18 cm)
试验段代号及长度	B-3(193 m)	k-8(300 m)	k-8(120 m)
试验段铺筑时间	2002 年10 月	2003 年4 月	2002 年4 月~5 月
试验段使用时间	1 年	1 年	2 年
使用效果	整体使用状况 良好,局部有 开裂及路表有 跑飞现象	良好	良好

表9 二灰砂砾试验路裂缝统计率汇总

试验路名称	平顶 山南—石线	平顶 山庙—洪线	陕西省道 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 月
横缝率(条/段) 2004 年观测	无(2 年)	无(1 年)	无(2 年)

### 5.2 二灰砂砾试验路简介

(1)平顶山市南—石线试验路属改建二级公路,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达到满足早期开放交通的要求,铺筑了此试验路。施工中采用半幅施工、半幅通车,交



替进行,试验路在铺筑过程中,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,修完后气温一直较低,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月首次观测试验路时,发现经过一个冬天的使用,试验段整体性能良好,但是局部存在下封处理不当,路表有跑飞现象,但表面无裂缝。

(2)为了在不同地区试验室内设计砂砾级配,在河南省道S242庙—洪线铺筑了设计方案试验路,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。

使用不到一年发现,原设计(水泥砂砾)段出现较多开裂,二灰砂砾设计段使用良好。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,试验路所用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%,氧化硅和氧化铝以及氧化铁含量为74.01%;石料压碎值为17.9%,针片状含量为12.8%。

设计二灰砂砾段经过近两年的使用,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提高。

### 5.3 二灰砂砾试验段小结

由于天然砂砾中都有细集料,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,且抗裂性能有提高。二灰砂砾试验段铺筑时间较短,使用效果仍需跟踪调查。

## 6 结语

(1)经过数条试验路的多年验证,发现在基于骨架结构思想基础上,针对二灰碎石采用限制最小粒径 $k$ 法,针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型二灰碎石中缺少了细集料,但是武一涉以及邯—临试验路的成功铺筑,表明其层底弯拉强度以及疲劳性能均能够满足重交通荷载要求。且室内结果表明,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)用抗裂系数 $S$ 来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)、极限失水率、最大温差等因素综合考虑,评价更为完善、合理。

## 参考文献:

- [1] 李炜光. 沥青路面半刚性基层抗裂性能研究[D]. 长安大学, 2002.
- [2] 申爱琴. 二灰砂砾基层综合路用性能及配比设计[R]. 长安大学, 2004.
- [3] 申爱琴, 等. 沥青路面抗裂技术研究[R]. 长安大学, 2002.
- [4] 郑南翔. 半刚性基层材料抗裂性能研究[D]. 西安公路学院, 1988.
- [5] 林绣贤. 柔性路面结构设计方法[M]. 人民交通出版社, 1988.

## 诸暨至安华快速通道工程动工

浙江省诸暨至安华快速通道建设工程正式动工。该路建成后,将为前往西施故里游玩的旅客提供更加便捷的交通条件。此路也是诸暨市首条一级公路。

诸暨至安华快速通道起自诸暨城区南环线与艮塔东路相交处,终于安华镇蔡家畈村,主线为一级公路,全长20.377 km,设计时速为100 km;安华、牌头两条支线为城市道路,总长2.645 km,设计时速为60 km。该路沿线将建大桥3座,中桥2座,小桥4座,工期13个月,初步设计概算总投资4.1亿元。

该线将通过五泄国家重点风景名胜区区域,建成后将为游客提供更大的交通方便和更好的交通环境。同时,该线的建设将使诸暨的公路网更加完备,对推动区域经济的发展起到积极作用。