

二灰砂浆配合比设计方法

滕旭秋^{1,2}, 陈忠达¹

(1. 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;
2. 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘 要:为了研究二灰碎石混合料中由二灰与细集料组成二灰砂浆的细集料级配、二灰与细集料的配比和石灰与粉煤灰的比例对其性能的影响,在单因素试验的基础上,以抗压强度为指标,采用正交试验方法确定了二灰砂浆材料组成的多水平试验方案,并应用极差分析法和方差分析法进行数据分析。结果表明,结合料与细集料的配比对指标作用高度显著,石灰与粉煤灰的比例对指标作用显著,而细集料的配比对指标作用不显著。

关键词:道路工程;二灰砂浆;正交试验;配合比设计

中图分类号:U416.1 **文献标识码:**A

Mixture design method for lime-fly ash mortar

TENG Xu-qiu^{1,2}, CHEN Zhong-da¹

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to research the effect of the gradation of fine aggregates, the ratio of lime-fly ash to fine aggregates and the ratio of lime to fly ash in lime-fly ash mortar on the compression strength of lime-fly ash mortar, which is made up of the fine aggregates and lime-fly ash in the mixture of lime-fly ash stabilized aggregates, taking the compression strength as an index, the orthogonal test that is based on the test of single factor was carried out to determine the multi-factors experiment project. The maximum difference analytical method and variance analytical method were applied to analyze the data. The test results indicate that the ratio of lime-fly ash to fine aggregates has a very significant effect on the index, the ratio of lime to fly ash has a significant effect on the index, but the gradation of fine aggregates has no significant effect on the index. 5 tabs, 3 figs, 6 refs.

Key words: road engineering; lime-fly ash mortar; orthogonal test; mixture design

0 引 言

二灰碎石混合料可看成是由粗集料($d \geq 4.75$ mm)、细集料($d < 4.75$ mm)和二灰 3 部分组成。将细集料加入二灰中,类似于水泥混凝土中的砂与水

泥的混合物,故称为二灰砂浆^[1]。作为分散相,颗粒粒径小于 4.75 mm 的细集料分散在二灰基体相中,形成颗粒增强材料,因而,细集料的加入可以明显改善二灰混合料的性能。利用砂浆替代纯二灰填充粗集料颗粒间的空隙,可以改善二灰碎石基层的路用性

能,特别是可进一步降低二灰碎石混合料的收缩^[2]。

在二灰碎石混合料的组成设计中,除了使二灰碎石混合料中的粗集料紧密排列^[3],形成良好的骨架结构之外^[4],密实的二灰砂浆应填满骨架间隙,并将骨架粘结成为整体。这样的结构型式是二灰碎石基层发挥优良路用性能的必要条件,也是进行配合比设计的指导思想。

1 二灰砂浆配合比设计

1.1 单因素试验

1.1.1 石灰与粉煤灰比例的确定方法

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 1 个最佳的配比,在这个配比下二灰混合料的性能最优,可通过试验确定其比例^[5]。

1.1.2 细集料级配的确定方法

细集料的级配按 k 法确定^[6]。 k 法是以颗粒分级重量递减系数 k 为参数的矿料级配曲线。如以 D 表示矿料最大粒径,当矿料粒径按 $1/2$ 递减时,其相应的各级粒径尺寸为: $d_0 = D/2^0$; $d_1 = D/2^1$; $d_2 = D/2^2$; \dots ; $d_n = D/2^n$, 其中 n 为粒径尺寸数。这样 $D \sim D/2$ 为第一级, $D/2 \sim D/4$ 为第二级, \dots 。

则通过某一筛孔 D_x 的百分率 P_x 为

$$P_x = 100 \left[1 - \frac{1 - k^{x-1}}{1 - k^m} \right] (\%)$$

式中: x 为级数, $x = 3.32 \lg(D/d_x)$; m 为粒料分档数目, $m = n - 1$ 。

对照国外规定与中国经验,当 $i = 0.55 \sim 0.75$ 时可以得到比较密实和使用满意的混合料。本次试验分别取 k 值为 0.55、0.60、0.65、0.70、0.75,利用 k 法计算的各档细集料的筛余百分比如表 1 所示。

为了比较不同细集料级配(不同 k 值)对二灰砂浆强度的影响,固定优选后的石灰与粉煤灰比例,同时保持结合料与细集料的比例不变,而使 k 值变化,通过重型击实试验,确定出对应的二灰砂浆的最大干密度和最佳含水量,并成型 $\Phi 10 \times h 10$ cm 的圆柱体试件。测试其 7 d 无侧限饱水抗压强度,优选出最合适的 k 值。由此确定细集料的级配。

表 1 各档细集料的筛余 /%

k 值	粒径/mm		
	4.75~2.36	2.36~1.18	1.18~0.60
0.55	54.41	29.61	15.98
0.60	51.46	30.56	17.98
0.65	48.69	31.35	19.96
0.70	46.11	31.98	21.91
0.75	43.70	32.47	23.83

1.1.3 二灰与细集料配比的确定

如果在进行二灰碎石中粗集料的级配设计时能够使粗集料颗粒相互啮合形成骨架结构,就能够保证二灰碎石混合料具有较好的抗收缩及抗冲刷性能;并且将二灰砂浆替代二灰填充粗集料的空隙,也能限制二灰的收缩。因此,在二灰砂浆设计中,仅以抗压强度为指标,而不必考虑抗收缩等性能指标。

固定石灰与粉煤灰的比例及细集料的级配(k 值)不变,变化结合料与细集料的比例,测试龄期为 7 d 的圆柱体试件($\Phi 10 \times h 10$ cm)的无侧限饱水抗压强度,优选出抗压强度最大的 1 组结合料与细集料的比例作为最终结果。

1.2 多因素试验

为了进一步研究 3 种因素(细集料级配、石灰与粉煤灰的比例、二灰与细集料的配比)对二灰砂浆强度的影响,在单因素分析的基础上,通过正交试验和极差分析法对试验结果进行分析,确定影响二灰砂浆强度因素的主次,优选最佳的试验方案,并通过方差分析各因素对试验指标的影响程度(表 2)。

表 2 因子水平表

因子水平	1	2	3	4
细集料级配[k 值](A)	0.60	0.65	0.70	0.75
二灰:细集料(B)	50:50	60:40	70:30	80:20
石灰:粉煤灰(E)	1:2.0	1:2.5	1:3.0	1:4.0

根据因子水平选择正交表,因本次试验属于 3 因子 4 水平试验,所以选用 $L_{16}(4^5)$ 正交表。

2 试验结果及分析

2.1 单因素试验结果及分析

2.1.1 石灰粉煤灰比例的确定

测试不同配比的石灰粉煤灰试件($\Phi 5 \times h 5$ cm)的 7 d 无侧限饱水抗压强度,试验结果见图 1。由图 1 可知,随着粉煤灰含量的增加,二灰的强度逐渐增长,但当增加到某一数值时,其强度反而会下降。对

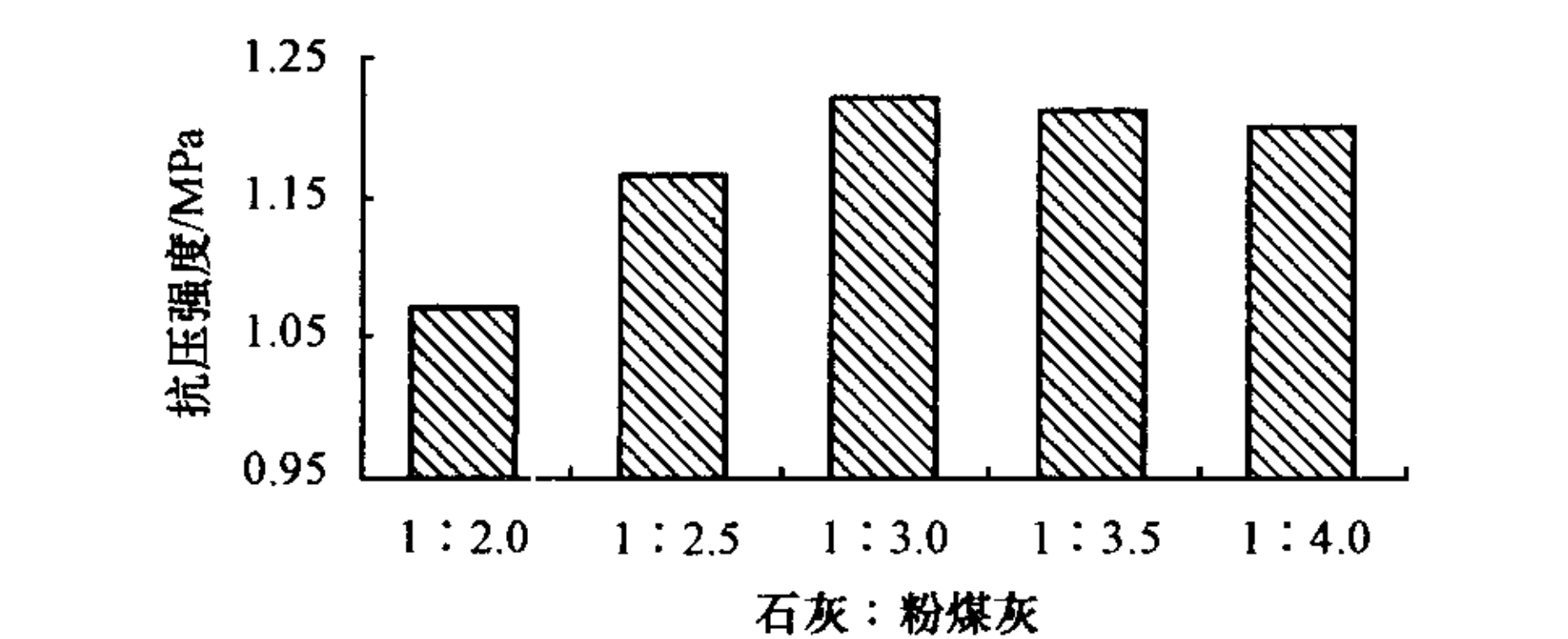


图 1 二灰混合料抗压强度

于本次试验所用原材料,当石灰与粉煤灰的比例为 1 : 3 时,二灰混合料抗压强度最大。通过重型击实试验测得此配比情况下的二灰的最大干密度为 1.224 g · cm⁻³,最佳含水量为 27%。

2.1.2 细集料级配的确定

为了比较细集料不同级配(不同 *k* 值)对二灰砂浆强度的影响,试验中取石灰粉煤灰的比例、结合料与细集料的比例均相同,即石灰与粉煤灰的配比为 1 : 3,二灰与细集料的配比为 20 : 80,取 *k* 值为 0.55、0.60、0.65、0.70、0.75,细集料的级配见表 1。试件 7 d 无侧限饱水抗压强度的试验结果见图 2。

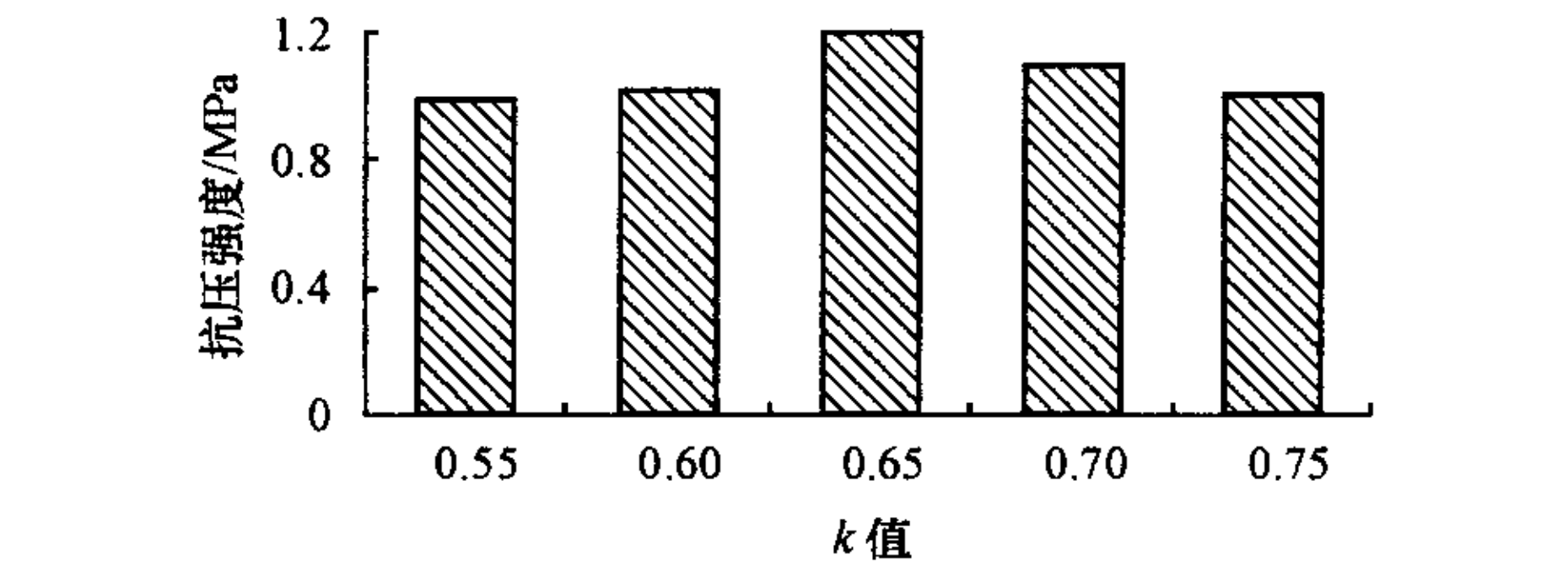


图 2 不同 *k* 值的二灰砂浆抗压强度

由图 2 知,当固定结合料与集料的比例为 20 : 80,石灰与粉煤灰的比例为 1 : 3 时,*k* 值取 0.65 时对应的试件(Φ10×*h*10 cm)7 d 无侧限饱水抗压强度取得最大值。

2.1.3 石灰与细集料配比的确定

固定 *k* 值为 0.65,石灰与粉煤灰的比例为 1 : 3,变化结合料与细集料的比例,量测试件 7 d 无侧限饱水抗压强度,试验结果如图 3 所示。

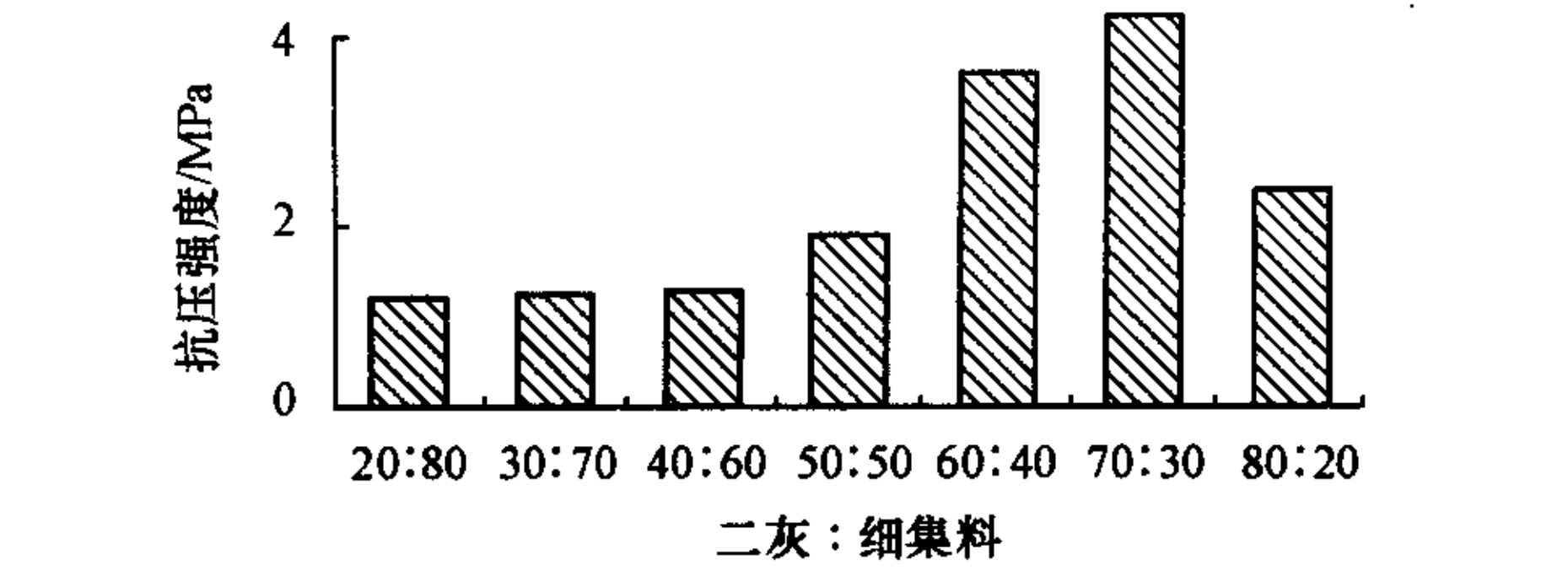


图 3 不同结合料与细集料比例的二灰砂浆抗压强度

从图 3 可知,当细集料与结合料用量比为 30 : 70 时,二灰砂浆的强度达到最大值。因此,在二灰砂浆配合比设计中,选取结合料与细集料的比例为 70 : 30。经重型击实试验确定在此比例下二灰砂浆的最大干密度为 1.56 g · cm³,最佳含水量为 13.4%。

2.2 多因素试验结果及分析

2.2.1 试验方案及试验结果

将试验因子和各水平列入正交表中即构成本次试验的试验方案。试验方案和试验结果见表 3。

表 3 试验方案及试验结果

试验号	A	B	C	D	E	抗压强度 /MPa
	细集料 <i>k</i> 值	二灰:细集料			石灰:粉煤灰	
N1	1(0.60)	1(50:50)	1	1	1(1:2.0)	1.791
N2	1(0.60)	2(60:40)	2	2	2(1:2.5)	2.076
N3	1(0.60)	3(70:30)	3	3	3(1:3.0)	2.574
N4	1(0.60)	4(80:20)	4	4	4(1:4.0)	1.646
N5	2(0.65)	1(50:50)	2	3	4(1:4.0)	1.685
N6	2(0.65)	2(60:40)	1	4	3(1:3.0)	2.219
N7	2(0.65)	3(70:30)	4	1	2(1:2.5)	2.762
N8	2(0.65)	4(80:20)	3	2	1(1:2.0)	1.699
N9	3(0.70)	1(50:50)	3	4	2(1:2.5)	1.695
N10	3(0.70)	2(60:40)	4	3	1(1:2.0)	2.024
N11	3(0.70)	3(70:30)	1	2	4(1:4.0)	2.061
N12	3(0.70)	4(80:20)	2	1	3(1:3.0)	2.032
N13	4(0.75)	1(50:50)	4	2	3(1:3.0)	1.619
N14	4(0.75)	2(60:40)	3	1	4(1:4.0)	1.556
N15	4(0.75)	3(70:30)	2	4	1(1:2.0)	2.419
N16	4(0.75)	4(80:20)	1	3	2(1:2.5)	1.835

注:1-试件为 Φ10×*h*10 cm 圆柱体试件;2-抗压强度是试件 7 d 无侧限饱水抗压强度。

2.2.2 试验结果分析

本文采用极差分析法分析试验结果,运用方差分析法进行验证。

(1)极差分析。极差分析只要对试验结果作少量计算,通过综合比较,便可得到最佳方案和因素影响程度。计算结果见表 4。

表 4 极差分析数据表

项目	A	B	C	D	E
	1	2	3	4	5
I _{<i>j</i>}	8.087	6.790	7.906	8.141	7.933
II _{<i>j</i>}	8.365	7.875	8.212	7.455	8.368
III _{<i>j</i>}	7.812	9.816	7.524	8.118	8.444
IV _{<i>j</i>}	7.429	7.212	8.051	7.979	6.948
R _{<i>j</i>}	0.936	3.026	0.688	0.686	1.496

表中 I_{*j*}、II_{*j*}、III_{*j*} 和 IV_{*j*} (*j* = 1,2,3,4,5) 是由表 3 中每列的同 1 个水平所对应的 4 个试验结果相加得到的;R_{*j*} 为直观分析法中的极差。

由 R_{*j*} 可知,第二列极差最大,第五列极差次之,

而第一列极差最小。这说明当因素 B 的水平变动时,对指标影响最大,而当因素 E 的水平变动时,对指标影响次之,而当因素 A 的水平变动时,对指标影响最小。由此可以根据极差的大小顺序排出因素的主次: $B > E > A$,即二灰与细集料的配比(因素 B)对强度影响最大,其次是石灰与粉煤灰的比例(因素 E),对强度影响最小的是细集料级配(因素 A)。

各因素所在列的 I_j 、 II_j 、 III_j 和 IV_j 的差异实际上只反映该因素由于水平变动引起指标的波动,而不受其他因素水平变动的影响,所以把各因素的好水平简单地组合起来就是较好的试验方案。由表中可以看出,当 k 取 0.65 时,试件抗压强度总和最大;当细集料用量为 30% 左右时,增强效果最好;而当石灰与粉煤灰的比值为 1:3 时,二灰砂浆抗压强度总和最大。这些都与单因素分析结果一致。故针对本次试验,较好的试验方案是 $A_2B_3E_3$ 。

(2) 方差分析。由表 5 可知,当显著性水平 α 取 0.05 时, $F_{0.05}(3,6)$ 为 4.76,故因素 B (结合料与细集料的配比)对指标作用高度显著。因此在试验及施工中应严格控制此因素;因素 E (石灰与粉煤灰的比例)作用显著,该因素应在试验和施工过程中加以重视;因素 A (细集料 k 值)作用不显著,在试验及施工过程中可不作为配合比设计的控制因素。由以上分析可看出,方差分析与极差分析的结果是一致的,说明在极差分析中判断 B 因素的作用显著并不是由于试验误差引起的,而是其本身对试验指标有显著影响。

表 5 方差分析数据表 ($F_{0.05}(3,6)=4.76$)

变差来源	A	B	E	误
S_j	0.120	1.344	0.355	0.142
自由度 f_j	3	3	3	6
\bar{S}_j	0.040	0.448	0.118	0.024
F_j	1.691	18.983	5.014	
显著性	不显著	高度显著	显著	

根据正交试验及极差分析和方差分析可知,当二灰的配比为 1:3、细集料的 k 值为 0.65、二灰与细集料的配比为 70:30 时,二灰砂浆的强度最高。

3 结 语

(1)在单因素试验的基础上,运用正交试验方法确定了影响二灰砂浆强度指标的主要因素,提出了

最优试验方案,并将各因素对试验指标影响的显著性进行了分析。

(2)采用正交试验方法,确定二灰砂浆与粗集料拌和而成的骨架密实型二灰碎石混合料的路用性能明显优于规范推荐级配的二灰碎石混合料的性能,这在后期的室内试验及试验路的观测中都得到证实。

参考文献:
References:

[1] 姜爱锋,任惠清. 二灰碎石组成配合比设计[J]. 同济大学学报,1999,27(3):309-313.
JIANG Ai-feng, REN Hui-qing. Mixture design of lime-fly ash stablized aggregates[J]. Journal of Tongji University,1999,27(3):309-313.

[2] 杨红辉,唐 娴,郝培文,等. 半刚性基层材料抗裂性评价方法[J]. 长安大学学报(自然科学版),2002,22(4):13-15.
YANG Hong-hui, TANG Xian, HAO Pei-wen, et al. Evaluation method for anti-cracking performance of semi-rigid base course[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition),2002,22(4):13-15.

[3] 胡龙泉,蒋应军,陈忠达,等. 骨架密实型水泥稳定碎石路用性能[J]. 交通运输工程学报,2001,1(4):37-40.
HU Long-quan, JIANG Ying-jun, CHEN ZHong-da, et al. Road performance of cement stablized aggregate of dense framework structure[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2001,1(4):37-40.

[4] 刘红瑛,戴经梁. 骨架密实二灰稳定碎石混合料配合比设计方法[J]. 长安大学学报(自然科学版),2003,23(2):11-16.
LIU Hong-ying, DAI Jing-liang. Design method of mixture skeleton densed with lime-flyash and crushed rock[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition),2003,23(2):11-16.

[5] 滕旭秋. 二灰碎石混合料配合比设计及路用性能研究[D]. 西安:长安大学,2003.
TENG Xu-qiu. Mixture design and pavement performance of lime-fly ash stabilized aggregates[D]. Xi'an: Chang'an University,2003.

[6] 林绣贤. 柔性路面结构设计方法[M]. 北京:人民交通出版社,1988.
LIN Xiu-xian. The method of structural design for flexible pavement [M]. People's Communication Press, 1988.