

文章编号: 0451—0712(2006)08—0034—07

中图分类号: TU528. 062

文献标识码: A

基于抗裂性能的水泥稳定碎石级配组成研究

孙兆辉

(同济大学道路与交通工程教育部重点实验室 上海市 200092)

摘 要: 运用级配设计理论和正交试验设计方法,针对水泥稳定碎石基层易产生裂缝这一缺陷,在总结已有研究成果的基础上,选取了多种典型集料级配设计方案,通过力学性能和物理性能试验,优选了抗裂性能良好的水泥稳定碎石集料级配设计方法和设计方案,并对水泥稳定碎石基层材料的合理级配组成进行了探讨。

关键词: 水泥稳定碎石; 正交试验; 级配组成; 无侧限抗压强度; 劈裂强度; 干缩应变; 温缩应变

集料级配是影响水泥稳定碎石强度、干缩和温缩稳定性、耐久性和施工性能的最主要的内部因素,也是水泥稳定碎石混合料组成设计的核心内容。通常的设计方法采用规范中推荐的连续级配形式,即按“松排骨架、紧密填充”的设计原则,尽可能将级配接近规范中值。此法虽具有易于压实的特点,但收缩裂缝较多。为了预防收缩裂缝的产生,有必要从基层材料自身级配组成设计方面进行研究,寻求抗裂性

能优良的水泥稳定碎石级配组成设计方法和设计方案。

1 级配优化设计方案

1. 1 原材料的基本性能

1. 1. 1 水泥的基本性能

水泥采用 32. 5 级普通硅酸盐缓凝水泥,主要性能指标见表 1。

表 1 水泥的基本性能

水泥品种	安定性 mm	凝结时间/min		强度(抗折/抗压强度) MPa		SO ₃ 含量 %	MgO 含量 %	烧失量 %	细度 %
		初凝	终凝	3 d	28 d				
32.5 级普通硅酸盐缓凝水泥标准	雷氏膨胀值<5	≥210	≥360	≥2.5/11.0	≥5.5/32.5	≤3.5	≤5.0	≤5.0	10.0
32.5 级普通硅酸盐缓凝水泥	1	281	385	4.3/18.9	7.3/39.5	1.86	1.71	2.70	4

1. 1. 2 集料的基本性能

集料采用苏州绕城高速公路西南段 HAL1 标提供的石灰岩,主要性能指标经测试均符合路用要求(见表 2)。

表 2 石灰岩集料主要性能指标测定结果

试验项目		指标	试验结果
石料压碎值/%		<24	19. 6
洛杉矶磨耗值损失		<30	20. 9
细长扁平 颗粒含量/%	13. 2~26 mm 规格碎石	<10	8. 0
	4. 75~13. 2 mm 规格碎石		5. 0

1. 2 正交试验设计

因主要考察集料级配组成对强度和变形指标的影响,水泥剂量采用一定值。根据前期试验结果,水泥剂量选用 4. 8%。工地中所用集料常分 4 档,故试验因素按如下 4 档划分,即:(1)1 号粗集料(13. 2 mm 以上筛的筛余集料);(2)2 号粗集料(通过 13. 2 mm 筛并留在 4. 75 mm 筛上的集料);(3)3 号细集料(通过 4. 75 mm 筛并留在 2. 36 mm 筛上的集料);(4)4 号细集料(通过 2. 36 mm 筛的集料)。

各因素(因子)的水平依据级配范围的上下限划分为低、中、高 3 个水平,分别用数字“2”、“1”、“3”

表示。低水平取级配范围的下限与中值的平均值;中水平取级配范围的中值;高水平取级配范围的上限与中值的平均值。级配组成范围(见表3)是在总结各国水泥稳定碎石基层材料集料组成设计及工程应用

的基础上,考虑水泥稳定碎石基层材料的干缩变形特性,通过控制粗、细集料关键筛孔的通过率,经理论计算而得。由于篇幅所限,本文不再详述。

表 3 水泥稳定碎石级配范围

筛孔尺寸/mm	26.5	19.0	16.0	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
通过百分率/%	100	90~100	78~88	66~76	50~60	27~37	17~23	10~16	5~11	3~7	2~4	1~3

由于要考察水泥稳定碎石基层材料在 4 种因素(每种因素有 3 个水平)作用下,不同的水平组合对其强度和变形指标的影响,以及分析出每种因素对

强度和变形指标影响的大小,区分出主、次因素,故选用正交表 $L_9(3^4)$,见表 4。

表 4 正交试验计算

试验编号	因子的水平				无侧限抗压强度	劈裂强度	最大干缩应变	最大温缩应变
	因子 a	因子 b	因子 c	因子 d	MPa	MPa	$\times 10^{-6}$	$\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
1	1	1	1	1	4.32	0.30	203.0	94.15
2	1	2	2	2	4.35	0.31	205.9	87.82
3	1	3	3	3	4.90	0.37	210.1	66.15
4	2	1	3	3	4.04	0.41	200.5	95.94
5	2	2	2	1	5.59	0.42	355.2	76.20
6	2	3	1	2	4.48	0.32	211.9	92.20
7	3	1	2	2	4.49	0.32	212.4	85.28
8	3	2	1	3	4.59	0.33	217.1	88.30
9	3	3	3	1	4.65	0.34	219.9	82.57
I _{KY}	13.57	12.85	13.39	14.56	平均值为 4.601	平均值为 0.347	平均值为 226.222	平均值为 85.40
II _{KY}	14.11	14.53	14.43	13.32				
III _{KY}	13.73	14.03	13.59	13.53				
D _{KY}	0.017	0.165	0.068	0.098				
I _{PL}	0.980	1.030	0.950	1.060				
II _{PL}	1.150	1.060	1.050	0.950				
III _{PL}	0.990	1.030	1.120	1.110				
D _{PL}	0.002 02	0.000 07	0.001 62	0.001 49				
I _{GS}	619.00	615.90	632.00	778.10				
II _{GS}	767.60	778.20	773.50	630.20				
III _{GS}	649.40	641.90	630.50	627.70				
D _{GS}	1 369.53	1 688.70	1 499.02	1 648.18				
I _{WS}	248.12	275.38	274.65	252.92				
II _{WS}	264.34	252.32	249.30	265.30				
III _{WS}	256.15	240.92	244.66	250.39				
D _{WS}	14.63	68.49	57.91	14.14				

注: I_{KY}为各因子1 水平抗压强度数据之和; II_{KY}为各因子2 水平抗压强度数据之和; III_{KY}为各因子3 水平抗压强度数据之和; I_{PL}为各因子1 水平劈裂强度数据之和; II_{PL}为各因子2 水平劈裂强度数据之和; III_{PL}为各因子3 水平劈裂强度数据之和; I_{GS}为各因子1 水平干缩应变数据之和; II_{GS}为各因子2 水平干缩应变数据之和; III_{GS}为各因子3 水平干缩应变数据之和; I_{WS}为各因子1 水平温缩应变数据之和; II_{WS}为各因子2 水平温缩应变数据之和; III_{WS}为各因子3 水平温缩应变数据之和; D_{KY}为各因子3 个水平下抗压强度数据平均值之间的离差; D_{PL}为各因子3 个水平下劈裂强度数据平均值之间的离差; D_{GS}为各因子3 个水平下干缩应变数据平均值之间的离差; D_{WS}为各因子3 个水平下温缩应变数据平均值之间的离差。

1.3 级配组成设计

1.3.1 试验方案

(1)1 号~9 号级配采用方法 1 计算,级配计算公式为:

$$P_{d_i}=A(\frac{d_i}{D_{\max}})^B\times100\% \tag{1}$$

式中: P_{d_i} 为筛孔尺寸 d_i 的通过量,%; D_{\max} 为集料的最大粒径,mm; d_i 为某筛孔尺寸,mm; A 、 B 分别为系数。

通过控制关键筛孔(19.0 mm、4.75 mm 以及 0.075 mm)的通过百分率,按粗、细集料分别进行计算。粗、细集料的分界线统一定为 4.75 mm。

例如:1 号级配选定 19 mm 筛孔的通过率为 95%,4.75 mm 筛孔的通过率为 32%,0.075 mm 筛孔的通过率为 2%。按公式(1)计算,可得计算粗集料级配的公式:

$$P_{d_i}=123.3501(\frac{d_i}{26.5})^{0.7849}\times100\%$$

计算细集料级配的公式:

$$P_{d_i}=32(\frac{d_i}{4.75})^{0.6683}\times100\%$$

按正交试验设计方法,选用 $L_9(3^4)$ 正交表,按照公式(1)计算,即得表 5 中 1 号~9 号级配的设计方案。

表 5 级配设计方案

级配编号	通过下列筛孔(mm)的集料的百分率/%											
	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
1	100	95.0	83.0	71.4	55.1	32.0	20.1	12.6	8.0	5.1	3.2	2.0
2	100	95.0	82.2	69.9	52.9	29.5	17.9	10.9	6.7	4.1	2.5	1.5
3	100	95.0	83.8	72.8	57.2	34.5	22.2	14.3	9.3	6.0	3.9	2.5
4	100	92.5	81.1	70.0	54.4	32.0	20.8	13.6	9.0	5.9	3.8	2.5
5	100	92.5	80.3	68.5	52.2	29.5	18.7	12.0	7.7	4.9	3.1	2.0
6	100	92.5	81.9	71.4	56.5	34.5	20.3	12.0	7.2	4.3	2.5	1.5
7	100	97.5	84.9	72.8	55.9	32.0	19.1	11.5	7.0	4.2	2.5	1.5
8	100	97.5	84.1	71.2	53.6	29.5	19.5	12.9	8.6	5.7	3.8	2.5
9	100	97.5	85.7	74.2	58.0	34.5	21.3	13.3	8.3	5.2	3.2	2.0
10	100	81.9	73.9	65.8	54	35.7	23.4	15.5	10.3	6.8	4.5	3
11	100	80.6	72	63.6	51.3	32.7	20.8	13.2	8.5	5.4	3.5	2.2

(2)10 号和 11 号级配采用方法 2 计算,按富勒公式 $P_d=(\frac{d_i}{D_{\max}})^n\times100\%$ 计算 $n=0.6$ 和 $n=0.65$ 时各筛孔的通过百分率,即得表 5 中 10 号~11 号级配的设计方案。

1.3.2 水泥剂量和含水量的确定

本文提出的级配范围较窄,故对击实试验做了简化。即分别对级配范围的上限级配、下限级配和中值级配所制试件进行击实试验,确定试件成型干密度和含水量,结果见表 6。

表 6 击实试验结果

级配类型	最佳含水量/%	最大干密度/(g/cm ³)
中值	5.2	2.36
上限	5.0	2.38
下限	5.2	2.34

由表 6 可见下限级配的集料偏粗,细集料含量低,不足以填充空隙,试件成型密度低,空隙率大;上限级配集料偏细,容易形成密实结构,从而干密度大。经比选,按最大干密度为 2.36 g/cm³、最佳含水量为 5.2%来制作试件。水泥剂量经试验选用 4.8%。

2 试验方法和试验结果

2.1 强度试验

按照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTJ 057—94)采用静压法成型试件,为 $\phi15\text{ cm}\times15\text{ cm}$ 的圆柱体。试件从试模内脱出并称量后,立即用塑料薄膜包覆,送至相对湿度大于 90%、温度为 $(25\pm2)\text{ }^\circ\text{C}$ 的养护室保湿养生到规定龄期,养生期的最后一天浸水,采用液式压力机进行无侧限抗压强度试验,采用 MTS 进行劈裂强度试验。

2.2 干缩试验

对 11 种集料级配在水泥用量为 4.8% 的条件下,制作试件尺寸为 10 cm×10 cm×40 cm 的中梁试件。试件采用液式压力机静压成型,成型的最大干密度和最佳含水量同强度试验。试件脱模后用塑料袋密封,置于温度为(25±2)℃的标准养护室保湿养生 7 d,之后,取出放在玻璃板上,在室内自然湿度下风干,测定不同失水率的收缩情况。试验持续到含水量不再减小、试件体积基本不变为止。试验在 10 月份进行,环境温度为 20℃左右,但通常水泥稳定碎石基层在夏季施工,环境温度为 30℃左右,故将其最大干缩应变测试结果进行了温度修正。即根据各级配在 20℃~30℃时实测温缩应变结果的平均值进行修正,表 4 中最大干缩应变值为 20℃时的观测结果与 20℃~30℃的实测温缩应变平均值(42.5×10⁻⁶/℃)之差。

2.3 温缩试验

温缩试验是将 11 种级配一次干缩试验后的中梁试件,浸水 1 min 后取出并置于玻璃板上,在室内自然温湿度条件下进行二次循环干缩试验,然后将二次循环干缩试验后的中梁试件在风干状态下,进行一次温缩试验,试验温度按由低到高和由高到低两种顺序变温,即试验温度由-15℃升温至 40℃,而后按 40℃、30℃、20℃、10℃、0℃、-10℃、-15℃顺序降温,采用路面材料胀缩仪进行保温控制,通过手持应变仪读取不同温度时试件的变形值。每一测点温度维持 12 h 不变,而后将试件浸水 1 min 取出置于玻璃板上,用湿布将梁表面、粘贴组件孔和玻璃板擦干,然后同玻璃板一起置于路面材料胀缩仪内保温,仍按前述两种顺序变温,通过手持应变仪读取不同温度时试件的变形值。每一测点温度维持 12 h 不变。由于试件饱水状态下的温缩应变 ϵ_d 通常高于风干状态下的 ϵ_d 值,故表 4 中试件最大温缩应变取饱水状态下的最大温缩应变值。试验结果见表 4。

3 试验结果分析

3.1 因子对指标影响大小的评定

3.1.1 因子对强度指标的影响

将表 4 中的离差数据加以比较,可以发现,因子 b 对 7 d 无侧限抗压强度影响最大,因子 d 次之,因子 a 影响最小。即按无侧限抗压强度影响因素的重要程度排序,依次为 2 号级配粗集料、4 号级配细集料、3 号级配细集料及 1 号级配粗集料。因子 a 对 7 d 劈裂强度的影响最大,因子 c 次之,因子 b 影响最小。

即按劈裂强度影响因素的重要程度排序,依次为 1 号级配粗集料、3 号级配细集料、4 号级配细集料和 2 号级配粗集料。

粗、细集料含量分别相同,但各档(4 档)集料含量不同,其无侧限抗压强度和劈裂强度试验结果不同。1 号、4 号和 7 号级配粗集料含量(68%)和细集料含量(32%)分别相同,但各档(4 档)集料含量不同,2 号级配粗集料和 3 号级配细集料含量提高,无侧限抗压强度提高;2 号级配粗集料和 3 号级配细集料含量低,无侧限抗压强度较低;1 号级配粗集料和 4 号级配细集料含量提高,劈裂强度提高。2 号、5 号和 8 号级配粗集料含量(70.5%)和细集料含量(29.5%)分别相同,但各档集料含量不同,无侧限抗压强度和劈裂强度试验结果不同。1 号级配粗集料含量偏高,劈裂强度提高,但 1 号级配粗集料含量过高施工时集料易产生离析,而其含量过低则不利于形成骨架密实结构。3 号、6 号、9 号级配粗集料含量(65.5%)和细集料含量(34.5%)分别相同,但各档集料含量不同,其中 2 号级配粗集料和 4 号级配细集料含量偏低,其无侧限抗压强度和劈裂强度降低;4 号级配细集料含量偏高,无侧限抗压强度和劈裂强度偏大。

为了了解各因子在某水平下对各指标影响的大小,还要计算因子某水平下的影响效应,即因子某水平下数据平均值与总平均值的偏离,计算结果参见表 7。

表 7 因子各水平下的效应计算

效应	因子 a	因子 b	因子 c	因子 d
I _{KY} 效应	-0.078	-0.318	-0.138	0.252
II _{KY} 效应	0.102	0.242	0.209	-0.161
III _{KY} 效应	-0.024	0.076	-0.071	-0.091
I _{PL} 效应	-0.020	-0.003	-0.030	0.007
II _{PL} 效应	0.037	0.007	0.003	-0.030
III _{PL} 效应	-0.017	-0.003	0.027	0.023
I _{GS} 效应	-19.89	-20.92	-15.56	33.14
II _{GS} 效应	29.64	33.18	31.61	-16.16
III _{GS} 效应	-9.76	-12.26	-16.06	-16.99
I _{WS} 效应	-2.70	6.39	6.15	-1.10
II _{WS} 效应	2.71	-1.30	-2.30	3.03
III _{WS} 效应	-0.02	-5.10	-3.85	-1.94

由表 7 可见,有利于无侧限抗压强度的水平搭配为 $a_2b_2c_2d_1$,即当 1 号级配、2 号级配粗集料和 3 号级配细集料通过各筛孔百分率取低水平,4 号级配细集料通过各筛孔百分率接近级配范围中值的搭配时,无侧限抗压强度最高。劈裂强度高的水平搭配为 $a_2b_2c_3d_3$,即 1 号级配和 2 号级配粗集料通过各筛孔百分率取低水平、3 号级配和 4 号级配细集料通过百分率取高水平的组合。

对无侧限抗压强度最不利的水平组合为 $a_1b_1c_1d_2$,即为 1 号级配、2 号级配粗集料和 3 号级配细集料各筛孔通过百分率接近级配范围中值,4 号级配细集料各筛孔通过百分率取低水平的组合。对劈裂强度最不利的水平组合为 $a_1b_1c_1d_2$ 或 $a_1b_3c_1d_2$ 。接近级配范围中值的级配并非最佳级配。

3.1.2 因子对干缩应变指标的影响

将表 4 中离差结果加以比较可知,对水泥稳定碎石干缩应变指标影响最大的是 2 号级配粗集料,4 号级配细集料次之,1 号级配粗集料影响最小,3 号级配细集料对干缩应变指标的影响居第三位。由此可见,水泥稳定碎石干缩应变指标与无侧限抗压强度指标关系最为密切。无论是强度指标还是干缩应变指标,都不能低估 2 号级配粗集料和 4 号级配细集料的作用,因为 2 号级配粗集料不仅起骨架作用,而且起填充空隙的作用,其用量多少直接关系到水泥稳定碎石结构类型,水泥稳定碎石混合料密实骨架结构对其用量较为敏感。

1 号、4 号和 7 号级配粗集料含量(68%)和细集料含量(32%)分别相同,但各档(4 档)集料含量不同,干缩应变测试结果不同,其中 2 号级配粗集料和 3 号级配细集料含量提高,其干缩应变提高;2 号级配粗集料和 3 号级配细集料含量低,其干缩应变较低。2 号级配和 8 号级配粗集料含量(70.5%)和细集料含量(29.5%)分别相同,但各档(4 档)集料含量不同,其中 2 号级配粗集料和 4 号级配细集料含量高,其无侧限抗压强度、劈裂强度和干缩应变值较大。3 号、6 号和 9 号级配粗集料含量(65.5%)和细集料含量(34.5%)分别相同,但各档集料含量不同,其中 2 号级配粗集料含量高,其干缩应变值较大。

由表 7 各因子不同水平下的效应计算结果可知,减小水泥稳定碎石干缩应变指标的水平组合为 $a_1b_1c_3d_3$,即为 1 号级配和 2 号级配粗集料各筛孔通过百分率接近级配范围中值、3 号级配和 4 号级配细集料各筛孔通过百分率取高水平的组合,有利于水

泥稳定碎石干缩变形的稳定。不利于水泥稳定碎石干缩变形特性的水平组合为 $a_2b_2c_2d_1$,即为 1 号级配、2 号级配粗集料和 3 号级配细集料各筛孔通过百分率取低水平,4 号级配细集料各筛孔通过百分率接近级配范围中值的组合不利于其干缩变形的稳定。由比较结果可知,有利于水泥稳定碎石强度和变形指标的各因子(因素)在水平选取上存在矛盾,如 $a_2b_2c_2d_1$ 的水平组合对提高水泥稳定碎石无侧限抗压强度最为有利,但对其干缩变形稳定最为不利。可见其强度愈高,干缩变形愈大。

3.1.3 因子对最大温缩应变指标的影响

由表 4 离差分析结果可知,因子 b 对最大温缩应变指标影响最大,因子 c 次之,因子 d 影响最小,即按最大温缩应变影响因素的重要程度排序,依次为 2 号级配粗集料、3 号级配细集料、1 号级配粗集料、4 号级配细集料。1 号、4 号和 7 号级配粗集料含量(68%)和细集料含量(32%)分别相同,但各档(4 档)集料含量不同,温缩应变测试结果不同,其中 2 号级配粗集料和 3 号级配细集料含量高、1 号级配粗集料和 4 号级配细集料含量低的组合,最大温缩应变小。2 号、5 号和 8 号级配粗集料含量(70.5%)和细集料含量(29.5%)分别相同,但各档(4 档)集料含量不同,其中 1 号级配粗集料含量高、2 号级配粗集料含量低,最大温缩应变小。3 号、6 号和 9 号级配粗集料含量(65.5%)和细集料含量(34.5%)分别相同,但各档集料含量不同,其中 1 号级配粗集料和 3 号级配细集料含量高、2 号级配粗集料和 4 号级配细集料含量低,最大温缩应变大;3 号级配细集料含量低,4 号级配细集料含量高,最大温缩应变小。由此可见,最大温缩应变随各档集料含量变化敏感,但并不直接相关,而与各筛孔通过百分率密切相关。

由表 7 各因子不同水平下的效应计算结果可知,其中有利于减小最大温缩应变的水平组合为 $a_1b_3c_3d_3$,即 1 号级配粗集料各筛孔通过百分率接近级配范围中值,2 号级配粗集料、3 号级配和 4 号级配细集料各筛孔通过百分率取高水平的组合。不利于减小最大温缩应变的水平组合为 $a_2b_1c_1d_2$,即 1 号级配粗集料和 4 号级配细集料各筛孔通过百分率取低水平、2 号级配粗集料和 3 号级配细集料各筛孔通过百分率接近级配范围中值的组合为不利组合。

3.2 显著性检验

众所周知,任何试验过程都存在误差,试验数据本身带有误差,通过试验数据计算出来的各个量也

带有误差,它们都将给准确分析带来困难。为了检验在误差的干扰下,因子对指标影响大小的评定是否准确,有必要对正交设计进行方差分析。本文受篇幅所限,略去方差分析表。

由方差分析结果可知,还没有 90% 的把握判断因子对强度和变形指标的影响是显著的,但各因子对 4 项指标影响重要程度的排序结果同离差分析结果一样,这说明在试验误差的干扰下,各因子对 4 项指标影响的评定是准确的。

3.3 有利水平组合的确定

表 8 不同水平组合条件下抗压强度、劈裂强度、最大干缩应变和最大温缩应变的工程平均

水平组合	$a_1b_1c_2$	$a_1b_1c_3$	$a_1b_2c_2$	$a_1b_2c_3$	$a_2b_1c_2$	$a_2b_1c_3$	$a_2b_2c_2$	$a_2b_2c_3$
无侧限抗压强度/MPa	4.414	4.114	4.974	4.694	4.594	4.314	5.154	0.273
劈裂强度/MPa	0.327	0.350	0.337	0.360	0.383	0.407	0.393	0.417
最大干缩应变/ $\times 10^{-6}$	217.02	169.36	271.12	223.46	266.56	218.89	320.66	272.99
最大温缩应变/ $(\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C})$	86.80	85.25	79.11	77.56	92.20	90.66	84.52	82.97

由分析结果可知,有利于无侧限抗压强度的水平搭配为 $a_2b_2c_2d_1$; 有利于劈裂强度的水平搭配为 $a_2b_2c_3d_3$; 有利于减小水泥稳定碎石干缩应变指标的水平组合为 $a_1b_1c_3d_3$; 有利于减小温缩应变指标的水平组合为 $a_1b_3c_3d_3$ 。不利于无侧限抗压强度的水平搭配为 $a_1b_1c_1d_2$; 不利于劈裂强度指标的水平搭配为 $a_1b_1c_1d_2$ 或 $a_1b_3c_1d_2$; 不利于干缩应变指标的水平组合为 $a_2b_2c_2d_1$; 不利于减小最大温缩应变的水平组合为 $a_2b_1c_1d_2$ 。因子 d 取 1 水平对干缩应变指标不利,取 2 水平对无侧限抗压强度、劈裂强度及最大温缩应变指标不利。故因子 d 选用水平 3,即选用 d_3 。表 8 中主要考察 $a(1、2$ 两水平)、 $b(1、2$ 两水平)、 $c(2、3$ 两水平) 3 个因子的水平搭配。由表 8 可知:有利于无侧限抗压强度的水平组合条件排序为 $a_2b_2c_2 > a_1b_2c_2 > a_1b_2c_3 > a_2b_1c_2 > a_1b_1c_2 > a_2b_1c_3 > a_2b_2c_3$; 有利于劈裂强度的水平组合条件排序为 $a_2b_2c_3 > a_2b_1c_3 > a_2b_2c_2 > a_2b_1c_2 > a_1b_2c_3 > a_1b_1c_3 > a_1b_2c_2 > a_1b_1c_2$; 对控制最大干缩应变有利的水平组合条件排序为 $a_1b_1c_3 > a_1b_1c_2 > a_2b_1c_3 > a_1b_2c_3 > a_2b_1c_2 > a_1b_2c_2 > a_2b_2c_3 > a_2b_2c_2$; 对控制最大温缩应变有利的水平组合条件排序为 $a_1b_2c_3 > a_1b_2c_2 > a_2b_2c_3 > a_2b_2c_2 > a_1b_1c_3 > a_1b_1c_2 > a_2b_1c_3 > a_2b_1c_2$ 。经综合考虑,强度指标不过低、变形指标不过大的水平组合为 $a_1b_2c_3d_3$,即为 1 号级配粗集料各筛孔通过百分率接近级配范围中值、2 号级配粗集料各筛孔通过百分率取低水平、3

综上所述,有利于水泥稳定碎石强度和变形指标的各因子在水平选取上存在矛盾,根据单项指标的分析,水平选取上有矛盾的因子,水平暂不选定。把各水平组合成不同的试验条件,计算相互矛盾的指标的工程平均,然后,根据问题的实际需要确定其水平。某试验条件下的工程平均为总平均与主要因子相应水平的效应之和。于是,计算出不同水平组合条件下 7 d 无侧限抗压强度、劈裂强度、最大干缩应变和最大温缩应变的工程平均,计算结果见表 8。

号级配和 4 号级配细集料各筛孔通过百分率取高水平的组合。若水泥稳定碎石基层在我国南方多雨地区铺筑、材料的变形特性以干缩变形为主时, $a_2b_1c_3d_3$ 组合对强度和干缩应变指标较为有利。

3.4 两种级配设计方法的比较

10 号、11 号级配试验结果见表 9。

表 9 两种级配设计方法试验结果的比较

级配类型	无侧限抗压强度 MPa	劈裂强度 MPa	最大干缩应变 $\times 10^{-6}$	最大温缩应变 $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
$a_1b_2c_3d_3$ 组合	4.7	0.36	223.5	77.56
$a_2b_1c_3d_3$ 组合	4.04	0.41	200.5	95.94
10 号级配	4.0	0.36	228.0	76.22
11 号级配	4.9	0.43	440.3	104.73

由表 9 可知,上述两种级配设计方法比较而言,按最大密实级配设计理论由富勒公式 $P_d = (\frac{d_i}{D_{\max}})^n \times 100\%$ 计算所得级配中,当 $n=0.65$ 时,即 11 号级配试件的最大干缩应变和最大温缩应变最大;当 $n=0.6$ 时,即 10 号级配试件的 7 d 无侧限抗压强度、劈裂强度及最大温缩应变最小,最大干缩应变较大。故根据实践经验,在采用控制关键筛孔进行理论计算所得的级配中, $a_1b_2c_3d_3$ 组合对强度和变形指标均有利; $a_2b_1c_3d_3$ 组合对强度和最大干缩应变指标有利,对最大温缩应变不利,适合在南方多雨地区使用。

4 结语

(1) 正交试验设计不仅可以确定各因素对指标影响的主从关系,而且可以确定各因素水平的最优组合。试验结果表明,采用控制关键筛孔通过百分率计算理论所得的级配中,2 号级配粗集料和 4 号级配细集料对无侧限抗压强度和干缩应变指标影响较大,故在集料级配设计中应注意比较,调整好其用量。2 号级配粗集料含量高,抗压强度高,干缩应变大;1 号级配粗集料和 4 号级配细集料含量高,劈裂强度高。

(2) 有利于水泥稳定碎石强度和变形指标的各因子在水平选取上存在矛盾,如 $a_2b_2c_2d_1$ 的水平组合对提高水泥稳定碎石无侧限抗压强度最为有利,但对其干缩变形稳定最为不利。可见其强度愈高,干缩变形愈大。

(3) 根据工程实践经验,采用控制关键筛孔通过百分率计算理论所得的级配中, $a_1b_2c_3d_3$ 组合对强度和变形指标均有利,即 1 号级配粗集料各筛孔通过

百分率接近级配范围中值、2 号级配粗集料各筛孔通过百分率取低水平、3 号级配和 4 号级配细集料各筛孔通过百分率取高水平的组合强度高、稳定性好; $a_2b_1c_3d_3$ 组合对强度和最大干缩应变指标有利,对最大温缩应变不利,适合在南方多雨地区使用。

(4) 在研究级配中,采用控制关键筛孔通过百分率计算理论所得的较优级配,比按富勒公式计算所得的较优级配的强度高、干缩变形小。

参考文献:

- [1] JTJ 057—94,公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S].
- [2] JTJ 034—2000,公路路面基层施工技术规范[S].
- [3] 胡龙泉,蒋应军,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).
- [4] Brown, Norman R. Solution for Distressed Pavement and Crack Reflection [J]. Eight International Conference on Low-Volume Roads 2003, USA, National Research Record, 2003, 1823.

A Study on Gradation Composition of Cement Stabilized Macadam Based on Crack Resistance Performance

SUN Zhao-hui

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji 200092, China)

Abstract: To counter the default of cracking easily of cement-stabilized macadam base course, the gradation design theory and orthogonal trail design method are used to select manifold representative aggregate gradation design schemes based on investigation fruits. Gradation design method and scheme of cement-stabilized macadam with well crack resistance performance are selected by mechanics and physics performance tests, and reasonable gradation composition of cement-stabilized macadam base course materials are discussed.

Key words: cement-stabilized macadam; orthogonal trail; gradation composition; unconfined compression strength; splittiting tensile strength; dry shrinkage strain; temperature shrinkage strain