

二灰碎石基层材料的合理结合料质量分数

吴传海^{1,2}, 袁玉卿¹, 郑南翔¹, 王选仓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. 广东交通集团 检测中心, 广东 广州 510800)

摘 要: 在二灰碎石最优级配的基础上, 根据集料不同密实状态下的空隙率变化结合料的体积分数, 通过力学性能、干缩、温缩性能试验, 研究结合料质量分数的变化对路用性能的影响, 并运用灰色关联决策对不同结合料质量分数下二灰碎石路用性能进行了综合评定。结果表明: 当石灰与粉煤灰的质量分数达到 21.5% 时, 二灰碎石 28 d 抗压强度、劈裂强度和抗压模量达到最大值; 二灰碎石 7 d 龄期的干缩应变随着结合料质量分数的减少而减小; 二灰碎石 7 d 龄期的总平均温缩系数(60℃~ -30℃)和低温平均温缩系数(10℃~ -30℃)随着结合料质量分数的减少而减小, 而高温平均温缩系数(60℃~ 10℃)呈增大趋势; 二灰结合料存在一个最佳体积分数, 即当二灰结合料的体积分数等于集料的松散状态下空隙率时, 其路用综合性能才能达到最优。

关键词: 道路工程; 二灰碎石; 基层材料; 合理结合料质量分数; 灰色关联

中图分类号: U414.11 **文献标志码:** A

Optimal volume content of binder in lime-fly-ash-stabilized aggregate

WU Chuan-hai^{1,2}, YUAN Yu-qing¹, ZHENG Nan-xiang¹, WANG Xuan-cang¹

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Centre of Testing, Guangdong Province Communications Group, Guangzhou 510800, Guangdong, China)

Abstract: On the basis of the optimal gradation of lime-fly-ash-stabilized aggregate and through the experiments of mechanical performance, temperature-shrinkage and dry-shrinkage properties, this paper analyzes the influence of different binder mass content, which is determined by vacuole rate of aggregate in different dense states, on road performance. With gray related strategy, this paper evaluates the road performance of lime-fly-ash-stabilized aggregate under different binder mass content comprehensively. By analyzing the tests, the optimal unconfirmed compression strength, cleavage strength and modulus of resilience(28 d) can be gained when the mass content of lime-fly-ash is 21.5%. After 7 d maintenance under standard conditions, the dry shrinkage tests indicate that the strain decreases when the content of lime and fly-ash is cut down. Furthermore, the temperature shrinkage coefficients, including the whole average coefficient, at the range of 60℃~ -30℃, and low temperature average coefficient, at the range of 10℃~ -30℃, reduce with the decrease of the content of lime and fly-ash. But the coefficient of temperature, at the range of 60℃~ 10℃, is quite the reverse. The results of evaluation show that the comprehensive road performance of lime-fly-ash-stabilized aggregate is optimal when the volume

of binder equals to the vacuole rate of aggregate in incompact states, which is an optimal binder content in the lime-fly-ash-stabilized aggregate. 5 tabs, 5 figs, 11 refs.

Key words: road engineering; lime-fly-ash-stabilized aggregate; base course mixture; optimal binder mass content; gray related strategy

0 引言

二灰碎石材料由于具有较高的强度、板体性能、比其他基层材料更好的抗裂性能、减少工业废渣对环境的危害、降低工程造价等优点,因而在高等级公路基层的修筑中得到了越来越普遍的应用。然而,由于文献[1]中关于二灰碎石混合料中石灰和粉煤灰(以下统称结合料)的质量分数确定时无量化的技术标准,实际设计、施工中只是依据文献[1]^[42]中“集料质量分数应在 80% 以上”一条规定,因而范围难于掌握;此外,在二灰碎石材料组成设计时仅采用了 7 d 的饱水无侧限抗压强度一个指标,这就难以设计出力学和抗裂性能均较优的基层材料^[2]。以上问题的存在,使二灰碎石这种优良、经济的基层材料在 many 高等级公路工程中结合料质量分数设计不合理,没有发挥出优良的路用性能。为此,本文在对二灰碎石混合料力学性能和收缩性能进行试验研究的基础上,用灰色关联决策法对不同结合料体积分数下的二灰碎石综合路用性能进行多目标定量评价,进而得到该材料综合路用性能最优时的合理结合料质量分数。

1 级配的选取

在考察结合料质量分数对二灰碎石路用性能的影响时,为了尽量减少级配因素的干扰,在综合考察多项路用性能的基础上优选出力学性能、抗冲刷性能、耐疲劳性能、抗裂性能等路用综合性能最优的级配,其级配中值及范围见表 1^[3]。

表 1 选取的最优级配

筛孔尺寸/mm		31.50	19.00	9.50	4.75	2.36
通过率/%	上限	100.0	71.0	41.0	17.0	10.0
	中值	97.5	62.0	31.0	12.0	5.0
	下限	95.0	53.0	21.0	7.0	0

2 结合料质量分数的设计

二灰碎石混合料通常有两种类型:一种是骨架密实式的,即集料质量分数占 75%~88%,且要求碎石具有规定的级配,石灰、粉煤灰质量分数为

12%~25%,主要起填充粒料的空隙和粘结作用;另一种是悬浮式的,集料质量分数一般小于 65%,不要求碎石具有一定级配,集料悬浮在石灰和粉煤灰结合料之间。对于悬浮式二灰碎石,因混合料中骨料之间不能形成嵌锁作用,骨料的多少对混合料的强度影响不大。但对于骨架密实式二灰碎石,集料具有一定的级配,能够形成一定的嵌锁作用,若集料质量分数过大,相应地二灰结合料的数量就要减少,混合料的整体强度将会有所下降;若结合料质量分数过大,又会造成集料形不成骨架,石灰、粉煤灰主要起着胶凝作用而不是填隙作用,这种二灰碎石混合料的刚度较大,容易开裂,且抗冲刷性能较差。因此,对于骨架密实式二灰碎石就存在一个最佳的结合料质量分数^[4]的优选问题。

为了确定骨架密实式二灰碎石的最佳结合料质量分数,在选取表 1 中的最优级配(中值)的基础上,根据集料的松散和捣实状态下的空隙率,改变二灰结合料的体积分数,对不同结合料质量分数的二灰碎石的力学性能、干缩、温缩性能进行了试验研究。根据文献[1]^[30],石灰与粉煤灰的质量比通常为 1:2~1:4,而各国有关的试验资料也显示,石灰与粉煤灰的质量比以 1:2~1:3 为宜^[5-6]。为此,本次试验将结合料中石灰与粉煤灰的质量比固定为 1:2.5。试验采用了陕西富平产消石灰、户县电厂湿排粉煤灰和陕西兴平云阳石灰岩碎石集料 3 种材料,集料级配按表 1 中值,采用反配法成型。

根据强度理论,假设在一个单位实方体混合料中,集料的最大用量为一个单位松方用量,结合料以最佳压实状态填充粒料的剩余空隙,则有以下结论:

(1)集料的干密度为 γ_1 , 平均相对密度(平均视密度)为 ρ , 则一个单位实方体中集料占有的体积为

$$V_1 = \gamma_1 \frac{1}{\rho}, \rho = 100 / \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{\rho_i}$$

式中: ρ_i 为集料各组成颗粒相对密度; A_i 为组成中各集料质量分数。

(2)结合料占有体积 $V_2 = 1 - V_1$ 。

(3)结合料的最大干密度为 γ_2 , 则结合料在单位实方体中占的质量为 $\gamma_2 V_2 = \gamma_2 (1 - V_1)$ 。

(4)混合料最大干密度为 γ_0 , 根据实方体中混

合料的质量为结合料与集料两部分质量之和,则有:
 $\gamma_0 = \gamma_1 + V_2 \gamma_2$; 又由结论(1)得知 $\gamma_1 = \rho V_1$, 所以,
 $\gamma_0 = \rho V_1 + \gamma_2 V_2$ 。

(5)计算结合料与集料的质量比。

结合料:集料 = $(\gamma_2 V_2 / \gamma_0) : (\rho V_1 / \gamma_0)$ 。

根据试验结果,所选级配集料的松散状态(堆积)下干密度为: $\gamma_1 = 1.69 \text{ g/cm}^3$, 捣实状态下干密度为: $\gamma_1' = 1.86 \text{ g/cm}^3$, 集料的平均相对密度为: $\rho = 2.78 \text{ g/cm}^3$, 结合料的干密度为: $\gamma_2 = 1.194 \text{ g/cm}^3$ 。因此,运用上述公式,计算可得二灰碎石混合料中结合料与集料的质量比。

在松散状态下,一个单位实方体中集料占有体积 $V_1 = \gamma_1 / \rho = 0.61$, 结合料占有体积 $V_2 = 1 - V_1 = 0.39$, 混合料最大干密度 $\gamma_0 = \gamma_1 + \gamma_2 V_2 = 2.156$, 结合料与集料的质量比为 21.5 : 78.5。

同理可得,在捣实状态下,一个单位实方体中粒料占有的体积 $V_1 = \gamma_1' / \rho = 0.67$, 结合料占有的体积 $V_2 = 1 - V_1 = 0.33$, 混合料最大干密度 $\gamma_0 = \gamma_1' + \gamma_2 V_2 = 2.25$, 结合料与集料的质量比为 17.5 : 82.5。

根据松散状态和捣实状态下集料的空隙率(分别为 39%和 33%),即结合料占有的体积比,可以改变这几种结合料体积分数(介于松散和捣实之间),即 $(39\% + 33\%) / 2 = 36\%$; 比松散状态体积分数更大,即 $(V_2 + 36\%) / 2 = 39\%$, $V_2 = 42\%$; 比捣实状态更少,即 $(V_2 + 36\%) / 2 = 33\%$, $V_2 = 30\%$ 。当集料处于 5 种不同密实状态下,这时就可得到,二灰碎石混合料中结合料体积分数分别为 42%、39%、36%、33%、30%。

依据实方体中混合料的质量为结合料与集料两部分质量之和,可得结合料的质量比分别为: 23.5%、21.5%、19.5%、17.5%、15.5%。为了便于叙述,依次将其表示为 1#、2#、3#、4#、5#。

3 路用性能试验研究

3.1 力学性能试验研究

本次试验,二灰碎石混合料按最佳含水量拌和,以最大干密度(98%)控制,用静压法成型。成型前先将拌和好的混合料在塑料袋中闷置 4~6 h,使其水分分布均匀(表 2)。试件用 $\Phi 15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ 圆柱型模成型,成型后的试件在常温 $20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ 、湿度 90%条件下养生,在龄期的最后 24 h 饱水,最后参照文献[7]进行各力学性能指标试验。试验结果如表 3 所示。

从图 1 可以看出,二灰碎石 7 d 抗压强度随集料质量分数的增加,即结合料质量分数的减少,基本

表 2 不同结合料质量分数二灰碎石最大干密度和最佳含水量

结合料质量 分数编号	结合料(石灰+粉煤 灰)质量分数/%	混合料质量配合比 (石灰:粉煤灰:碎石)	最佳含 水量/%	最大干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
1#	23.5	6.5 : 17.0 : 76.5	10.9	2.02
2#	21.5	6.0 : 15.5 : 78.5	9.7	2.06
3#	19.5	5.5 : 14.0 : 80.5	9.0	2.09
4#	17.5	5.0 : 12.5 : 82.5	7.8	2.14
5#	15.5	4.5 : 11.0 : 84.5	6.9	2.16

注:结合料中石灰与粉煤灰的质量比固定为 1 : 2.5。

表 3 不同结合料质量分数二灰碎石力学性能试验结果

结合料质量 分数编号	抗压强度/MPa		劈裂强度/MPa		抗压模量/MPa	
	7 d	28 d	7 d	28 d	7 d	28 d
1#	1.032	2.27	0.035	0.14	172	596
2#	1.158	2.56	0.054	0.16	276	689
3#	1.046	2.27	0.040	0.14	153	560
4#	1.134	2.23	0.051	0.11	183	573
5#	1.191	2.04	0.060	0.11	207	604

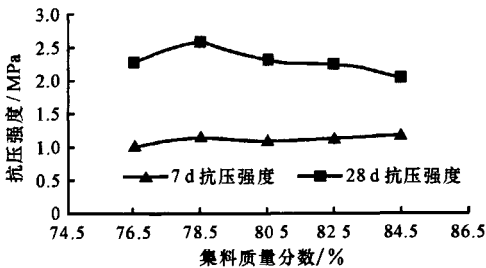


图 1 抗压强度随集料质量分数的变化

呈上升趋势,但上升不明显;而 28 d 抗压强度随集料质量分数的变化存在一个明显的最佳值。这是因为二灰碎石的强度主要由骨料的嵌锁、结合料生成高强度的结晶凝胶物质、凝胶物质与骨料的粘结和固定作用 3 部分组成,石灰、粉煤灰进行化学反应需一定的时间,7 d 内生成的凝胶物质有限,而本级配为优良级配,骨架密实结构形成较好,骨料的嵌锁作用产生的摩阻力占有较大的比重,因此结合料质量分数变化对二灰碎石的 7 d 强度影响较小;随着龄期的增长,生成的结晶凝胶物质增多,其发挥的作用增强,因此随集料质量分数的增加(结合料减少),抗压强度基本上呈下降趋势;至于结合料质量分数存在一最佳值,是因为当结合料质量分数适中时,混合料整体能够形成骨架密实结构,这样凝胶物质与骨料的粘结和固定作用发挥了较大的优势。

从图 2 可知,集料质量分数的变化对二灰碎石劈裂强度的影响与其对抗压强度的影响基本相似,即 7 d 的劈裂强度随集料质量分数增加呈缓慢的上升趋势,而 28 d 的劈裂强度则随集料质量分数增长呈下降趋势,但存在一最佳值,这也间接证明了二灰碎石的

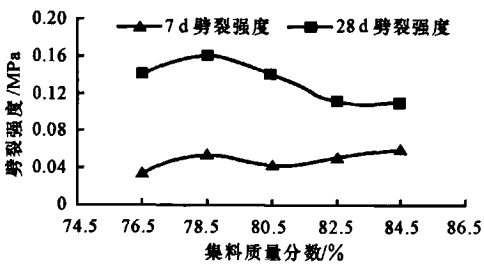


图 2 劈裂强度随集料质量分数的变化

各龄期劈裂强度与抗压强度有很强的相关性。

从图 3 可知,集料质量分数的变化对二灰碎石 7 d 龄期抗压模量的影响与其对 28 d 抗压模量的影响基本一致,即随集料质量分数的增加抗压模量变化不大,但在适中时会产生一突变。这是因为当一实方体的二灰碎石混合料采用 1 松方的集料时,集料相互靠拢而不密实,剩余空隙部分才能全为结合料填充,这样结合料的胶结作用和集料的嵌挤作用共同得到了发挥。

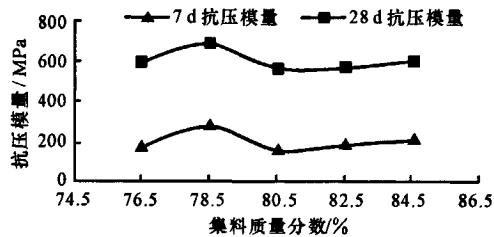


图 3 抗压模量随集料质量分数的变化

3.2 收缩性能的试验研究

本次干燥和温度收缩试验均采用电测法,试件

成型方法同力学性能试验,试件尺寸为 10 cm×10 cm×40 cm,在常温和一定温度下养生 7 d。干缩试验时,将到期的试件贴上应变片,称重后放入 40 ℃恒温箱内,通过应变数据采集仪每隔 2 h 采集一次应变值,直至数据基本不变为止;温缩试验时,将做完干缩试验的试件升温至 60 ℃,待应变读数稳定后,按每 10 ℃温度间隔降温,到达所需温度且应变读数稳定后,再继续降温,直至-30 ℃为止。试验结果见表 4、表 5 及图 4、图 5。

(1)干缩试验结果。二灰碎石 7 d 龄期的干缩应变随着结合料质量分数的减少,即集料质量分数的增加基本呈减小趋势。这是因为随着结合料质量分数的减少,混合料中的毛细管和比表面积减小,这使得混合料内的颗粒表面吸附水及毛细管水的比例也随之减少,而水分的蒸发是导致二灰碎石干燥收缩的主要原因。另外,当结合料体积分数恰好填充集料的松散空隙时,干缩应变出现反常,可能是因为这种结构的整体性强,颗粒之间连接紧密,使得干缩应变减小。虽然干缩应变随集料质量分数增加而减小,但由于其最佳含水量不同,最大失水率也不同,根据各国的研究成果,一般认为,用全部干缩过程的平均干缩系数来衡量半刚性材料的干缩性能比较合适。从表 4 中可知,2# 的平均干缩系数最小,即干缩性能最好;1# 其次;4# 再次之;3# 较次;5# 最次。

(2)温缩试验结果。随着结合料质量分数的减

表 4 不同结合料质量分数二灰碎石干缩试验结果

结合料质量	各时刻的干缩应变/10 ⁻⁶																					最大失	平均干缩	
分数编号	2 h	4 h	6 h	8 h	10 h	12 h	14 h	16 h	18 h	22 h	26 h	30 h	34 h	38 h	42 h	46 h	50 h	54 h	58 h	62 h	66 h	70 h	水率/%	系数/10 ⁻⁶
1 #	68	95	126	145	163	188	202	212	221	230	241	251	263	272	280	287	297	301	304	305	307	307	8.04	38.18
2 #	68	80	102	117	133	146	157	165	174	193	203	216	228	237	241	246	256	261	264	264	264	264	7.28	36.26
3 #	57	78	116	146	183	189	198	203	208	216	230	236	244	253	262	268	283	290	293	294	294	294	6.79	43.30
4 #	52	74	109	120	122	129	140	144	148	162	186	199	215	228	238	240	245	249	249	249	249	249	5.92	42.06
5 #	41	60	82	97	107	113	123	130	135	147	163	176	190	204	218	229	235	241	244	244	244	244	5.26	46.39

注:平均干缩系数=最终干缩应变(70 h 处)/最大失水率。

表 5 不同结合料质量分数二灰碎石温缩系数试验结果

结合料质量 分数编号	各降温区段平均温缩系数/(10 ⁻⁶ ·℃ ⁻¹)									温缩系数统计值/(10 ⁻⁶ ·℃ ⁻¹)			
	60℃~	50℃~	40℃~	30℃~	20℃~	10℃~	0℃~	-10℃~	-20℃~	高温平均值	低温平均值	总平均值	最大值
	50℃	40℃	30℃	20℃	10℃	0℃	-10℃	-20℃	-30℃	(60℃~10℃)	(10℃~-30℃)	(60℃~-30℃)	
1#	5.28	7.23	6.70	6.78	4.55	12.00	12.03	10.25	6.85	6.11	10.28	7.96	12.03
2#	5.65	6.83	6.30	5.43	4.05	10.15	11.05	9.45	6.58	5.65	9.31	7.28	11.05
3#	5.40	5.83	6.40	6.10	5.83	11.43	10.93	7.93	6.33	5.91	9.16	7.35	11.43
4#	5.41	6.30	5.51	6.45	6.30	10.23	10.05	8.35	5.60	5.99	8.56	7.13	10.23
5#	4.83	5.98	5.70	6.68	7.10	8.35	9.65	9.05	4.58	6.06	7.91	6.88	9.65

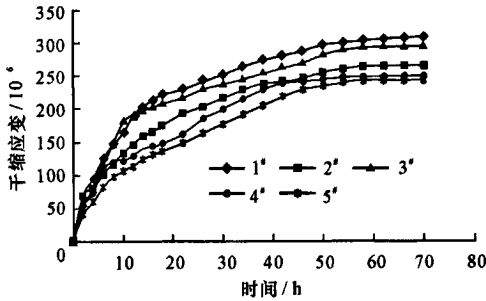


图4 不同结合料质量分数二灰碎石干缩应变随时间的变化

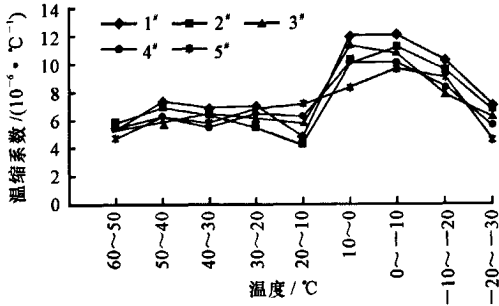


图5 不同结合料质量分数二灰碎石温缩系数随温度的变化

少,二灰碎石 7 d 龄期的总平均温缩系数(60 °C ~ -30 °C)和低温平均温缩系数(10 °C ~ -30 °C)呈减小趋势,而高温平均温缩系数(60 °C ~ 10 °C)基本上呈增大趋势,但两种变化趋势都比较平缓,影响不明显。这主要是因为,当结合料质量分数增大时,生成的结晶凝胶物质增多,而凝胶物质具有比原材料大的温缩系数,自然温缩系数增大,但凝胶物质的生成量是有限的,且占整个材料的很少一部分,因此增长的幅度很小。从图 5 中还可发现,不同结合料质量分数的二灰碎石在 10 °C ~ 0 °C 和 0 °C ~ -10 °C 两个降温区间均表现出了较大的温缩系数,尤其是在 10 °C ~ 0 °C 区间增长幅度特别大。

4 结合料最佳质量分数的确定

不同结合料质量分数的二灰碎石在各个路用性能指标上的优劣顺序并不是完全一致的,为了得出一个综合路用性能最优的混合料,可运用灰色关联决策的方法。根据局势效果向量与最优效果向量的关联程度来评价局势的优劣;关联程度可通过关联度大小来反映,其基本思想是根据序列曲线几何形状的相似程度来判断其联系是否紧密,曲线越接近,则发展变化态势愈接近,关联程度就越大。对不同结合料质量分数的二灰碎石进行了多目标定量评价,具体步骤如下^[8]:

(1) 记二灰碎石的路用性能为 a_i , 称事件集 $A = \{a_i\}$; 记 1# 为方案 b_1 , 2# 为方案 b_2 , 3# 为方案 b_3 , 4# 为方案 b_4 , 5# 为方案 b_5 , 则方案集 $B = \{b_1, b_2,$

$b_3, b_4, b_5\}$

于是有局势集

$$S = \{s_{ij} = (a_i, b_j) | a_i \in A, b_j \in B\} =$$

$$\{s_{11}, s_{12}, s_{13}, s_{14}, s_{15}\}$$

(2) 确定目标。记 7 d、28 d 的抗压强度分别为目标 1、目标 2; 7 d、28 d 的劈裂强度分别为目标 3、目标 4; 7 d、28 d 的抗压模量分别为目标 5、目标 6; 7 d 龄期平均干缩系数为目标 7; 7 d 龄期总平均温缩系数为目标 8。

(3) 求 k 目标下局势效果序列。

$$u^{(k)} (k=1, 2, 3, \dots, 8)$$

$$u^{(1)} = (0.928, 1.041, 0.940, 1.020, 1.071)$$

$$u^{(2)} = (0.998, 1.126, 0.998, 0.981, 0.897)$$

$$u^{(3)} = (0.729, 1.125, 0.833, 1.063, 1.250)$$

$$u^{(4)} = (1.061, 1.212, 1.061, 0.833, 0.833)$$

$$u^{(5)} = (0.868, 1.393, 0.772, 0.923, 1.044)$$

$$u^{(6)} = (0.986, 1.140, 0.927, 0.948, 0.999)$$

$$u^{(7)} = (0.926, 0.879, 1.050, 1.020, 1.125)$$

$$u^{(8)} = (1.087, 0.995, 1.004, 0.974, 0.940)$$

(4) 由此可得局势 s_{ij} 的效果向量 $u_{ij} (i=1; j=1, 2, 3, 4, 5)$ 。

$$u_{11} = (0.928, 0.998, 0.729, 1.061, 0.868, 0.986, 0.926, 1.087)$$

$$u_{12} = (1.041, 1.126, 1.125, 1.212, 1.393, 1.140, 0.879, 0.995)$$

$$u_{13} = (0.940, 0.998, 0.833, 1.061, 0.772, 0.927, 1.050, 1.004)$$

$$u_{14} = (1.020, 0.981, 1.063, 0.833, 0.923, 0.948, 1.020, 0.974)$$

$$u_{15} = (1.071, 0.897, 1.250, 0.833, 1.044, 0.999, 1.125, 0.940)$$

(5) 求理想最优效果向量。因为目标 1, 目标 2, ..., 目标 6 均为力学性能指标(抗压模量为早期), 显然越大越好, 所以

$$u_{i_0 j_0}^{(k)} = \max_{i=1} \{u_{ij}^{(k)}\} = (1.071, 1.126, 1.250, 1.212, 1.393, 1.140)$$

$$k=1, 2, 3, 4, 5, 6; 1 \leq j \leq 5$$

目标 7、目标 8 均为收缩性能指标, 越小越好, 所以

$$u_{i_0 j_0}^{(k)} = \min_{i=1} \{u_{ij}^{(k)}\} = (0.879, 0.940)$$

$$k=7, 8; 1 \leq j \leq 5$$

从而有理想最优向量

$$u_{i_0 j_0}^{(k)} = (1.071, 1.126, 1.250, 1.212, 1.393,$$

1.140, 0.879, 0.940)

(6) 计算 u_{ij} 与 $u_{i_0j_0}$ 的灰色绝对关联度 ϵ_{ij} ($i=1$; $j=1, 2, 3, 4, 5$)。

$\epsilon_{11} = 0.787$, $\epsilon_{12} = 0.956$, $\epsilon_{13} = 0.764$, $\epsilon_{14} = 0.681$, $\epsilon_{15} = 0.685$

(7) 由 $\max_{i=1} \{\epsilon_{ij}\} = \epsilon_{12} = 0.956$ 可知, b_2 方案为最优, 即 2# 为结合料的最佳质量分数。另外, 可知其他结合料质量分数按综合路用性能的优劣排序为: $2^\# > 1^\# > 3^\# > 5^\# > 4^\#$ [9-11]。

5 结 语

(1) 二灰碎石 7 d 抗压强度随结合料质量分数的减少, 基本呈上升趋势, 但上升不明显, 而 28 d 抗压强度随结合料质量分数的变化具有明显的最佳值。

(2) 结合料质量分数的变化对二灰碎石 7 d 和 28 d 劈裂强度的影响趋势与其对相应龄期抗压强度的影响趋势基本相似, 这也间接证明了二灰碎石劈裂强度与抗压强度有很大的相关性。

(3) 结合料质量分数的变化对二灰碎石 7 d 和 28 d 抗压模量的影响趋势基本一致, 即随结合料质量分数的减少抗压模量变化不大, 但在质量分数适中时会产生突变。

(4) 二灰碎石 7 d 龄期的干缩应变随着结合料质量分数的减少基本呈减小趋势。

(5) 二灰碎石 7 d 龄期的总平均温缩系数 ($60^\circ\text{C} \sim -30^\circ\text{C}$) 和低温平均温缩系数 ($10^\circ\text{C} \sim -30^\circ\text{C}$) 随着结合料质量分数的减少, 呈减小趋势, 而高温平均温缩系数 ($60^\circ\text{C} \sim 10^\circ\text{C}$) 基本上呈增大趋势, 但两种变化趋势都比较平缓, 影响不明显。

(6) 二灰碎石混合料中, 二灰结合料存在一个最佳体积分, 即当二灰结合料的体积分数等于集料在松散状态下的空隙率时, 其路用综合性能才能达到最优。

参考文献:

References:

[1] JTJ 034-2000, 公路路面基层施工技术规范[S].
[2] 林绣贤. 半刚性基层沥青路面[M]. 北京: 人民交通出版社, 1991.

[3] 陈忠达, 袁万杰, 高春海. 多级嵌挤密实级配设计方法研究[J]. 中国公路学报, 2006, 19(1): 32-37.
CHEN Zhong-da, YUAN Wan-jie, GAO Chun-hai. Research on design method of multilevel dense built-in gradation [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(1): 32-37.
[4] 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.
[5] 周卫峰, 赵可, 王德群, 等. 水泥稳定碎石混合料配合比的优化[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2006, 26(1): 24-28.
ZHOU Wei-feng, ZHAO Ke, WANG De-qun, et al. Mix ratio optimization design of cement stabilized macadam based on static pressure method and vibration method [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(1): 24-28.
[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] JTJ 057-94, 公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S].
[8] 吴传海. 高等级公路基层材料二灰碎石路用性能综合评定及合理配合比研究[D]. 西安: 长安大学, 2001.
[9] 刘思峰, 党耀国, 方志耕, 等. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
[10] 郑南翔, 吴传海. 二灰碎石力学性能影响因素的灰色理论分析[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2004, 24(5): 20-23.
ZHENG Nan-xiang, WU Chuan-hai. Mechanics performances for lime fly-ash broken stone mixture by gray theory [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(5): 20-23.
[11] 常小马, 田见效, 邵丽霞. 多碎石沥青混合料路用性能[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2005, 25(5): 25-28.
CHANG Xiao-ma, TIAN Jian-xiao, SHAO Li-xia. Properties of asphalt with plentiful aggregate [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005, 25(5): 25-28.