

细集料粒径对沥青砂浆黏弹性参数 影响程度的灰熵分析

应荣华¹, 侯昭光¹, 庞海峰²

(1 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410004 2 辽宁省交通厅公路管理局, 辽宁 沈阳 110005)

摘要: 对不同细集料粒径组成的沥青砂浆进行单轴压缩蠕变试验, 用 Burgers 模型拟合蠕变试验结果, 并通过灰熵法分析了细集料粒径对黏弹性参数的影响程度, 以研究沥青砂浆的黏弹性特性。研究结果表明: 1.18~2.36 mm 档集料对黏弹性参数 E_1 、 E_2 、 η_2 均产生显著的影响; 小于 0.075 mm 档集料对 4 个黏弹性参数的影响程度都居于其次; 2.36~4.75 mm 档集料对参数 η_1 的影响程度显著。

关键词: 道路工程; 沥青砂浆; 细集料; 蠕变试验; Burgers 模型; 影响程度; 灰熵法

中图分类号: U414

文献标志码: A

文章编号: 1674-0696(2010)03-0398-05

Influence of Fine Aggregate Particle Size on Viscoelastic Parameters of Asphalt Mortar by Gray Entropy Method

YING Rong-hua¹, HOU Zhao-guang¹, PANG Hai-feng²

(1 School of Traffic & Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, Hunan, China; 2 Highway Management Bureau of Liaoning Communications Department, Shenyang 110005, Liaoning, China)

Abstract: Uni-axial compression creep test is carried out on asphalt mortar of different fine aggregate compositions, and the results of creep test are fitted by Burgers model. Then the influence degree of fine aggregate particle size on viscoelastic parameters is analyzed by the gray entropy method in order to make a preliminary study of the viscoelastic property of asphalt mortar. The results show that the aggregates ranging from 1.18 mm to 2.36 mm exert significant influence on viscoelastic parameters E_1 , E_2 and η_2 ; the influence of aggregates smaller than 0.075 mm on four viscoelastic parameters takes the second place; the aggregate ranging from 2.36 mm to 4.75 mm exerts significant influence on viscoelastic parameters η_1 .

Key words: road engineering; asphalt mortar; fine aggregate; creep test; Burgers model; influence degree; gray entropy method

沥青混合料具有复杂的组成结构, 细观力学分析时通常被处理成集料、沥青基质和孔隙三相体系^[1]。所谓沥青砂浆就是在沥青中加入细集料($d \leq 4.75$ mm)组成的一种理想沥青混合料^[2], 胶浆理论认为沥青砂浆是以细集料为分散相而分散在沥青胶浆分散介质中的一种细分散系。分析沥青砂浆的黏弹特性有助于理解沥青混合料的复杂力学行为。Burgers 模型^[3]能够较好地反映沥青混合料黏弹性, 具有模型参数少且模拟精度较高的特点。沥青砂浆细集料粒径的大小、细集料的级配组成及细集料的物理性质都会影响沥青砂浆的性能, 从而影响到沥青混合料的性能。本文通过对不同细集料粒径组成的沥青砂浆进行单轴压缩蠕变试验, 用 Burgers 模型拟合蠕变试验结果, 并通过灰熵法分析了

细集料粒径对黏弹性参数的影响程度, 以初步探索沥青砂浆的黏弹性特性。

1 灰熵分析法

灰熵分析法^[4]是一种系统分析方法, 可以在不完全的信息中对所要分析研究的各因素, 通过一定数据处理, 在随机的因素序列中找到其关联性, 提炼出影响系统的主要因素、主要特征和因素间对系统影响的差别, 是在灰关联分析基础上发展起来的, 克服了灰关联分析时基于行为因子序列的微观或宏观局部关联倾向、个性信息损失等缺点, 从而使分析结果更加准确, 其分析步骤如下:

1.1 映射量的确定及均值化处理

在选取映射量时, 应遵循功能性、可获取性、完

收稿日期: 2009-12-25 修订日期: 2010-03-12

作者简介: 应荣华(1961—), 男, 湖南娄底人, 副教授, 主要从事路基路面工程方面的研究。E-mail: Yingronghua@vip.sina.com

©1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

整性、可比性和非重叠性原则, 选准反映系统行为特征的数据系列。均值化处理方法如下: 设 $\tilde{x}_0 = [\tilde{x}_0(1), \tilde{x}_0(2), \dots, \tilde{x}_0(n)]$ 为参考列, $\tilde{x}_i = [\tilde{x}_i(1), \tilde{x}_i(2), \dots, \tilde{x}_i(n)]$ 为比较列, 按式 $x_i(k) = \tilde{x}_i(k)/\tilde{x}_0(k) (k=1, 2, \dots, n; i=1, 2, \dots, m)$ 进行原始序列的均值化处理, 得到无量纲参考列 $\tilde{x}_0 = [\tilde{x}_0(1), \tilde{x}_0(2), \dots, \tilde{x}_0(n)]$, 比较列 $\tilde{x}_i = [\tilde{x}_i(1), \tilde{x}_i(2), \dots, \tilde{x}_i(n)] (k=1, 2, \dots, n; i=1, 2, \dots, m)$ 。

1.2 计算灰熵关联系数

比较列与参考列之间的灰熵关联系数按式(1)计算:

$$\xi_i[\tilde{x}_0(k), \tilde{x}_i(k)] = \frac{\min_{i=1, m} \min_{k=1, n} \Delta_i(k) + \rho \max_{i=1, m} \max_{k=1, n} \Delta_i(k)}{\Delta_i(k) + \rho \max_{i=1, m} \max_{k=1, n} \Delta_i(k)} \quad (1)$$

式中: ρ 是分辨系数, 通常取 0.5; $\min_{i=1, m} \min_{k=1, n} \Delta_i(k)$ 为两极最小差; $\max_{i=1, m} \max_{k=1, n} \Delta_i(k)$ 为两极最大差。

1.3 计算灰熵关联密度

$$P_h = \frac{\xi[\tilde{x}_0(h), \tilde{x}_i(h)]}{\sum_{k=1}^n \xi[\tilde{x}_0(h), \tilde{x}_i(h)]} \quad (h=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

1.4 计算灰关联熵与灰熵关联度

灰关联熵计算公式如式(3), 然后按照式(4)计

算序列 \tilde{x}_i 的灰熵关联度。

$$H(R_i) = - \sum_{k=1}^n P_h \ln P_h \quad (3)$$

$$E(\tilde{x}_i) = H(R_i)/H_{\max} \quad (4)$$

式中: $H_{\max} = \ln(n)$ 表示由 n 个元素构成的差异信息列的最大值)。

1.5 关键影响因素分析

由灰熵关联度的计算得到序列的排序准则^[5]: 比较列的灰熵关联度越大, 则比较列与参考列的关联性越强。从而找出影响参考序列的关键因素, 进行关键影响因素分析。

2 沥青砂浆单轴静载蠕变试验

2.1 试验方案

试验采用 AH-70 重交沥青, 25℃针入度为 65 (0.1 mm), 15℃延度为 174 cm, 软化点为 50℃。在试验分析中, 按细集料粒径大小的不同分为 6 档, 即 0.075 ~ 0.15, 0.15 ~ 0.3, 0.3 ~ 0.6, 0.6 ~ 1.18, 1.18 ~ 2.36, 2.36 ~ 4.75 mm, 分别来研究每一档料对沥青砂浆性能的影响^[6]。参照某工程实际采用的细粒式沥青混合料 AC-13 级配曲线(表 1), 设计不同组成的沥青砂浆, 如表 2。I ~ VII 表示不同档的粒径范围。I 为沥青胶浆(粉胶比为 1:1), II ~ VII 分别为 0.075 ~ 0.15, 0.15 ~ 0.3, 0.3 ~ 0.6, 0.6 ~ 1.18, 1.18 ~ 2.36, 2.36 ~ 4.75 mm。

表 1 AC-13 参考级配
Tab 1 Reference gradation of AC-13

筛孔孔径/mm	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
通过百分率/%	100	96	80	47	32.5	21	15	11	7	5

表 2 沥青砂浆组成设计
Tab 2 Composition design of asphalt mortar

配比	I	II	III	IV	V	VI	VII
1#	1-1	80	20	—	—	—	—
	1-2	70	30	—	—	—	—
	1-3	60	40	—	—	—	—
2#	2-1	62.5	12.5	25	—	—	—
	2-2	54	11	35	—	—	—
	2-3	46	9	45	—	—	—
3#	3-1	50	10	20	20	—	—
	3-2	44	9	17	30	—	—
	3-3	37.5	7.5	15	40	—	—
4#	4-1	38.5	7.5	15.5	15.5	23	—
	4-2	33.5	6.5	13.5	13.5	33	—
	4-3	28.5	5.5	11.5	11.5	43	—
	5-1	30	6.5	12.5	12.5	18.5	20
5#	5-2	27	5.5	10.5	10.5	16.5	30
	5-3	23	4.5	9.5	9.5	13.5	40
	6-1	21.5	4	8.5	8.5	13	21.5
6#	6-2	18.5	4	7.5	7.5	11	21.5
	6-3	16	3.2	6.4	6.4	9.6	18.4

2.2 试验结果

2.2.1 劲度模量变化曲线

试验中采用先进的 MTS-810 材料测试系统。试验温度 10℃, 应力比 0.1, 同时为了使试件机压头与试件的端面接触良好, 避免加载时对试件的冲击, 通常要对试件施加预加应力, 以便在整个蠕变试验过程中, 压头对试件均保持一定的荷载水平, 本试验采用壳牌法建议的预载水平 2%, 即 0.002 MPa^[7]。沥青砂浆蠕变劲度曲线如图 1。

2.2.2 Burgers 模型参数拟合

Burgers 模型由两个弹簧元件与两个黏壶元件组合而成, 即 Maxwell 与 Kelvin 的串联^[8], 见图 2。

其本结构方程为:

$$\sigma + P_1 \dot{\sigma} + P_2 \sigma = q_1 \epsilon + q_2 \dot{\epsilon} \quad (5)$$

式中: $P_1 = (\eta_1 E_1 + \eta_1 E_2 + \eta_2 E_1)/E_1 E_2$; $P_2 = \eta_1 \eta_2/E_1 E_2$; $q_1 = \eta_1$; $q_2 = \eta_1 \eta_2/E_2$ 。

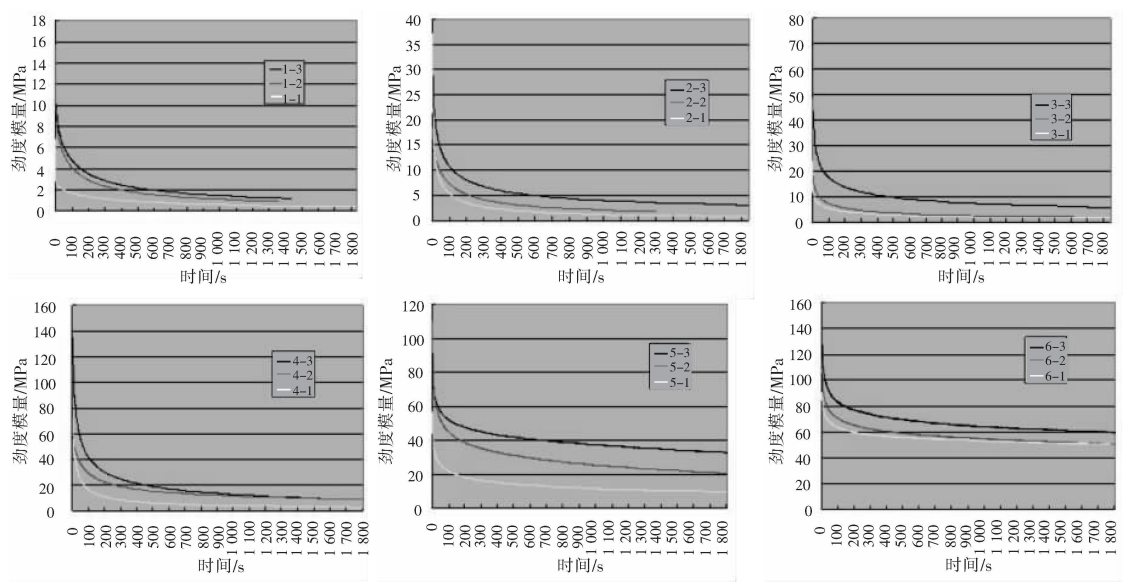


图 1 蠕变刚度曲线
Fig 1 Creep stiffness curves

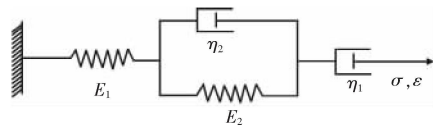


图 2 Burger 模型示意图

Fig 2 Schematic diagram of Burgers model

瞬时弹性系数 E_1 的大小反映了沥青路面在高速行驶车荷载作用下的抗变形能力;纯黏性系数 η_1 是产生不可恢复的残留变形的性系数;延迟弹性系数 E_2 也是弹性元件,起到阻止 Voigt 性系数 η_2 变形发展的作用,但在荷载除去之后变形不能立即恢复。瞬时弹性系数 E_1 所产生的变形在卸载后可以完全恢复,由试件的延迟弹性系数 E_2 和 Voigt 性系数 η_2 所组成的开尔文模型的变形也是可以逐渐恢复的,唯纯黏性系数 η_1 的黏性流动成为不可恢复的永久变形。采用 Burgers 模型对试验结果进行模型参数拟合^[9-10],拟合结果见表 3。

表 3 沥青砂浆单轴压缩蠕变试验 Burger 模型参数拟合

Tab 3 Parameter fitting of uniaxial compression creep test of asphalt mortars based on Burgers model

编号	E_1 /MPa	E_2 /MPa	η_1 /MPa	η_2 /MPa	R^2
1-1	2.75	2.40	1 121.14	828.52	0.999
1-2	10.00	3.95	1 830.11	1 016.82	0.999
1-3	11.20	4.72	2 669.13	1 140.81	0.999
2-1	17.51	2.63	2 348.69	1 200.88	0.999
2-2	17.22	5.80	4 052.35	1 779.12	0.999
2-3	24.11	8.06	11 641.74	2 277.59	0.999
3-1	13.85	4.93	5 131.95	1 113.65	0.997
3-2	22.63	7.45	7 868.68	1 909.62	0.998
3-3	29.4	16.72	20 658.44	3 278.27	0.997
4-1	33.12	7.905	9 082.62	2 876.77	0.999
4-2	34.86	34.47	17 828.03	4 293.56	0.999
4-3	47.53	22.13	27 802.83	3 407.88	0.994

(续表 3)

编号	E_1 /MPa	E_2 /MPa	η_1 /MPa	η_2 /MPa	R^2
5-1	42.14	27.00	36 480.68	4 182.77	0.996
5-2	101.30	63.64	72 705.55	5 249.04	0.996
5-3	70.78	131.29	192 649.34	15 154.25	0.992
6-1	54.04	139.94	405 501.77	12 977.85	0.988
6-2	103.83	172.85	448 593.07	16 121.76	0.988
6-3	118.53	211.83	441 871.45	17 872.58	0.979

2.2.3 细集料粒径对沥青砂浆 Burger 模型黏弹性参数影响程度分析

分析中以不同试验方案组合下拟合的黏弹性参数 E_1 (瞬时弹性参数)为参考列,以不同档粒径的配比(影响因素序列)为比较序列(影响因素 1~7 表示小于 0.075、0.075~0.15、0.15~0.3、0.3~0.6、0.6~1.18、1.18~2.36、2.36~4.75 mm 不同档的粒径范围。得到灰关联熵分析的原始数列表 4 对表 4 进行均值变换(同时将所有指标转换为正项指标),生成数列见表 5。按照式(1)计算出各影响因素与瞬时弹性系数 E_1 的关联系数,其结果见表 6 所列。根据式(2)计算得灰熵关联密度结果见表 7 所列,最后按照式(3)、式(4)计算出灰关联熵和灰熵关联度,如表 8。各影响因素对瞬时弹性参数 E_1 影响程度如图 3。

按照同样的方法,依次选取不同试验方案组合下的纯黏性系数 η_1 、延迟弹性系数 E_2 、Voigt 黏性系数 η_2 作为参考列,以不同档粒径的配比(影响因素)为比较序列,进行灰关联熵分析,得到各影响因素对纯黏性系数 η_1 、延迟弹性系数 E_2 、Voigt 黏性系数 η_2 的影响程度如图 4~图 6。

表 4 灰关联熵分析原始序列

Tab 4 Original series of grey relation entropy analysis

编号	E	I	II	III	IV	V	VI	VII
1	2 75	0 400	0 200	0 000	0 000	0 000	0 000	0 000
2	10 00	0 350	0 300	0 000	0 000	0 000	0 000	0 000
3	11 20	0 300	0 400	0 000	0 000	0 000	0 000	0 000
4	17 51	0 313	0 125	0 250	0 000	0 000	0 000	0 000
5	17 22	0 270	0 110	0 350	0 000	0 000	0 000	0 000
6	24 11	0 230	0 090	0 450	0 000	0 000	0 000	0 000
7	13 85	0 250	0 100	0 200	0 200	0 000	0 000	0 000
8	22 63	0 220	0 090	0 170	0 300	0 000	0 000	0 000
9	29 40	0 188	0 075	0 150	0 400	0 000	0 000	0 000
10	33 12	0 193	0 075	0 155	0 155	0 230	0 000	0 000
11	34 86	0 168	0 065	0 135	0 135	0 330	0 000	0 000
12	47 53	0 143	0 055	0 115	0 115	0 430	0 000	0 000
13	42 14	0 150	0 065	0 125	0 125	0 185	0 200	0 000
14	101 30	0 135	0 055	0 105	0 105	0 165	0 300	0 000
15	70 78	0 115	0 045	0 095	0 095	0 135	0 400	0 000
16	54 04	0 108	0 040	0 085	0 085	0 130	0 245	0 000
17	103 83	0 093	0 040	0 075	0 075	0 110	0 215	0 000
18	118 53	0 080	0 032	0 064	0 064	0 096	0 184	0 200

表 5 均值化无量纲处理

Tab 5 Equalization and dimensionless treatment

编号	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7
1	0 004	0 108	0 102	0 000	0 000	0 000	0 000	0 000
2	0 013	0 095	0 153	0 000	0 000	0 000	0 000	0 000
3	0 015	0 081	0 204	0 000	0 000	0 000	0 000	0 000
4	0 023	0 084	0 064	0 099	0 000	0 000	0 000	0 000
5	0 023	0 073	0 056	0 139	0 000	0 000	0 000	0 000
6	0 032	0 062	0 046	0 178	0 000	0 000	0 000	0 000
7	0 018	0 068	0 051	0 079	0 108	0 000	0 000	0 000
8	0 030	0 059	0 046	0 067	0 162	0 000	0 000	0 000
9	0 039	0 051	0 038	0 059	0 216	0 000	0 000	0 000
10	0 044	0 052	0 038	0 061	0 084	0 127	0 000	0 000
11	0 046	0 045	0 033	0 054	0 073	0 182	0 000	0 000
12	0 063	0 039	0 028	0 046	0 062	0 237	0 000	0 000
13	0 056	0 041	0 033	0 050	0 067	0 102	0 130	0 000
14	0 134	0 037	0 028	0 042	0 057	0 091	0 194	0 000
15	0 094	0 031	0 023	0 038	0 051	0 075	0 259	0 000
16	0 072	0 029	0 020	0 034	0 046	0 072	0 159	0 222
17	0 138	0 025	0 020	0 030	0 041	0 061	0 139	0 333
18	0 157	0 022	0 016	0 025	0 035	0 053	0 119	0 444

表 6 灰熵关联系数

Tab 6 Grey entropy relation coefficients

编号	ξ_1	ξ_2	ξ_3	ξ_4	ξ_5	ξ_6	ξ_7
1	0 580	0 595	0 977	0 977	0 977	0 977	0 977
2	0 640	0 508	0 917	0 917	0 917	0 917	0 917
3	0 686	0 432	0 908	0 908	0 908	0 908	0 908
4	0 702	0 781	0 655	0 862	0 862	0 862	0 862
5	0 742	0 813	0 554	0 864	0 864	0 864	0 864
6	0 750	0 819	0 467	0 913	0 913	0 913	0 913
7	0 746	0 816	0 703	0 617	0 888	0 888	0 888
8	0 831	0 902	0 795	0 522	0 828	0 828	0 828
9	0 926	0 996	0 877	0 449	0 788	0 788	0 788

(续表 6)

编号	ξ_1	ξ_2	ξ_3	ξ_4	ξ_5	ξ_6	ξ_7
10	0 948	0 963	0 893	0 785	0 635	0 767	0 767
11	0 995	0 918	0 953	0 845	0 514	0 758	0 758
12	0 856	0 805	0 893	0 995	0 452	0 696	0 696
13	0 905	0 865	0 960	0 927	0 757	0 662	0 721
14	0 596	0 576	0 609	0 650	0 770	0 706	0 518
15	0 697	0 671	0 720	0 773	0 883	0 466	0 606
16	0 773	0 738	0 792	0 849	1 000	0 624	0 489
17	0 561	0 552	0 572	0 598	0 652	0 990	0 424
18	0 516	0 506	0 523	0 541	0 581	0 793	0 334

表 7 灰熵关联分布密度值

Tab 7 Distribution densities of grey entropy relation

编号	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7
1	0 043	0 045	0 071	0 070	0 069	0 068	0 074
2	0 048	0 038	0 067	0 066	0 065	0 064	0 069
3	0 051	0 033	0 066	0 065	0 064	0 063	0 069
4	0 052	0 059	0 048	0 062	0 061	0 060	0 065
5	0 055	0 061	0 040	0 062	0 061	0 060	0 065
6	0 056	0 062	0 034	0 065	0 064	0 063	0 069
7	0 056	0 062	0 051	0 044	0 063	0 062	0 067
8	0 062	0 068	0 058	0 037	0 058	0 058	0 063
9	0 069	0 075	0 064	0 032	0 056	0 055	0 059
10	0 071	0 073	0 065	0 056	0 045	0 053	0 058
11	0 074	0 069	0 069	0 060	0 036	0 053	0 057
12	0 064	0 061	0 065	0 071	0 032	0 048	0 053
13	0 067	0 065	0 070	0 066	0 053	0 046	0 054
14	0 044	0 043	0 044	0 047	0 054	0 049	0 039
15	0 052	0 051	0 052	0 055	0 062	0 032	0 046
16	0 057	0 056	0 058	0 061	0 071	0 043	0 037
17	0 042	0 042	0 042	0 043	0 046	0 069	0 032
18	0 038	0 038	0 038	0 039	0 041	0 055	0 025

表 8 灰关联熵和灰熵关联度

Tab 8 Grey relation entropy and the relation grade of grey entropy

影响因素序号	灰关联熵	灰熵关联度
1	2 873 5	0 994 2
2	2 862 6	0 990 7
3	2 866 7	0 991 8
4	2 866 4	0 991 7
5	2 869 7	0 992 8
6	2 876 3	0 995 1
7	2 856 3	0 988 2

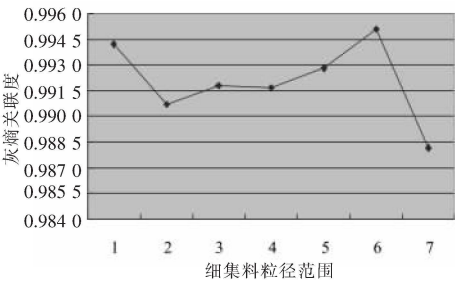


图 3 以 E_1 为参考序列的因素灰熵关联度

Fig 3 The relation grade of grey entropy

taking E_1 as a referential sequence

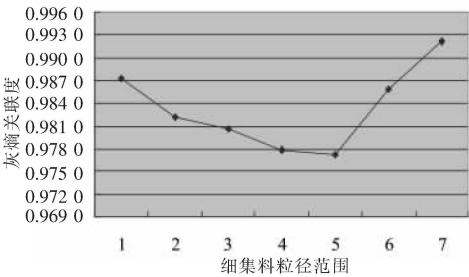


图 4 以 η_1 为参考序列的因素灰熵关联度
Fig 4 The relation grade of grey entropy taking η_1 as reference sequence

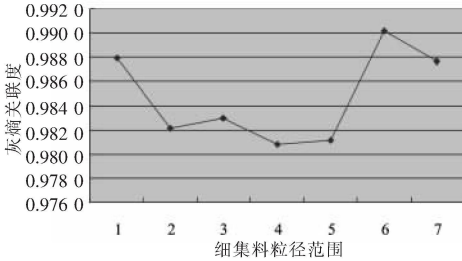


图 5 以 E_2 为参考序列的因素灰熵关联度
Fig 5 The relation grade of grey entropy taking E_2 as reference sequence

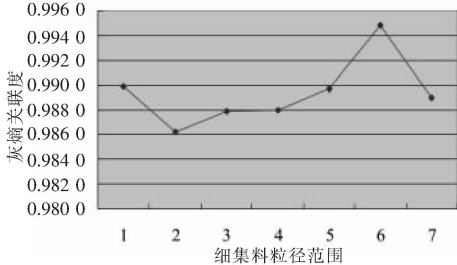


图 6 以 η_2 为参考序列的因素灰熵关联度
Fig 6 The relation grade of grey entropy taking η_2 as a reference sequence

2.2.4 主要影响因素分析

从图 3 ~ 图 6 看出: 各档集料对沥青砂浆 Burgers 模型黏弹性参数影响程度为:

对瞬时弹性系数 E_1 的影响程度, 1.18 ~ 2.36 mm 档集料最为显著, 小于 0.075 mm 档集料次之, 2.36 ~ 4.75 mm 档集料影响最小。

各因素对纯黏性系数 η_1 的影响程度为: 2.36 ~ 4.75 mm > (< 0.075 mm) > 1.18 ~ 2.36 mm > 0.075 ~ 0.15 mm > 0.15 ~ 0.30 mm > 0.30 ~ 0.60 mm > 0.60 ~ 1.18 mm;

对延迟弹性系数 E_2 的影响程度, 1.18 ~ 2.36 mm 档集料最为显著, 小于 0.075 mm 档集料次之, 0.30 ~ 0.60 mm 档集料影响最小。

各因素对 Voigt 黏性系数 η_2 的影响程度为: 1.18 ~ 2.36 mm > (< 0.075 mm) > 0.60 ~ 1.18 mm > 2.36 ~ 4.75 mm > 0.30 ~ 0.60 mm > 0.15 ~ 0.30

mm > 0.075 ~ 0.15 mm。

由此可见: 随着沥青砂浆中集料含量的增加, 沥青砂浆的性能越来越表现为弹性, 黏性比例逐渐减小, 从而抗永久变形能力逐渐增强。沥青混合料级配设计中可适当提高较细集料的用量, 以提高砂浆的黏结力, 以很好的改善沥青胶浆的性能, 从而提高混合料的强度和抗裂性能。

3 结 论

对“小样本”、“贫信息”的系统来说, 灰关联熵分析法是一种简单实用且结果比较准确的方法, 它可以在不完全的信息中, 分析随机因素序列的关联性, 发现影响系统的主要因素和因素间对系统影响的差别, 因此需要较少的试验量, 具有较高实用价值。笔者运用灰关联熵分析方法, 分析了细集料粒径对沥青砂浆黏弹性参数的影响程度。研究结果表明, 1.18 ~ 2.36 mm 档集料对瞬时弹性系数 E_1 、延迟弹性系数 E_2 、Voigt 黏性系数 η_2 均产生显著的影响; 小于 0.075 mm 档集料对 Burgers 模型 4 个黏弹性参数的影响程度都居于次要位置; 2.36 ~ 4.75 mm 档集料对纯黏性系数 η_1 的影响程度显著, 将显著影响沥青砂浆抗永久变形的能力。

参考文献:

[1] Masad E, Tashman L, Somadevan N. Micromechanics based analysis of stiffness anisotropy in asphalt mixtures [J]. The Journal of Engineering Mechanics, 2002, 14 (5): 374—383

[2] Li Y Q, Metcalf J B. Two step approach to prediction of asphalt concrete modulus from two phase micromechanical models [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2005, 17 (4): 407—415

[3] 王随原, 周进川. SBS 改性沥青混合料蠕变性能试验研究 [J]. 公路交通科技, 2006, 23 (12): 10—13

[4] 徐松, 唐伯明, 朱洪洲, 等. 基于灰熵法的沥青稳定碎石水稳定性影响因素分析 [J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2008, 27 (6): 1077—1078

[5] 张岐山, 郭喜江, 邓聚龙. 灰关联熵分析方法 [J]. 系统工程理论与实践, 1996 (8): 7—11

[6] 黄宝涛, 田伟平. 具有长期使用性能的沥青砂浆配合比设计方法 [J]. 公路, 2008 (4): 148—151

[7] 沈金安. 沥青及沥青混合料路用性能 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.

[8] 张肖宁. 沥青与沥青混合料的粘弹力学原理及应用 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2006

[9] 封基良, 黄晓明. 沥青粘结剂粘弹性参数确定方法的研究 [J]. 公路交通科技, 2006, 23 (5): 16—18, 22

[10] 陈静云, 周长红, 王哲. 沥青混合料蠕变试验数据处理与粘弹性计算 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2007, 37 (6): 1092—1095.