

Analysis of Structural Parameters and Creep Characteristics of Asphalt Mixture

Haiquan Liu¹, Lun Ji¹, Lei Zhang², Jun Li¹, Wendong He^{1,3}

¹School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang

²China Road & Bridge Co., Ltd., Beijing

³Shanxi Transportation Research Institute, Taiyuan Shanxi

Email: jilunhit@126.com

Received: Feb. 28th, 2018; accepted: Mar. 14th, 2018; published: Mar. 21st, 2018

Abstract

The structure of asphalt mixture influences its creep characteristics. In order to study the relationship between the structure parameters and creep characteristics of asphalt mixtures, the creep tests of different gradation (5 kinds of AC and 5 kinds of SMA) asphalt mixtures were carried out, and the relationship between creep properties and structural parameters was discussed based on the Burgers creep model. The results show that the increase of coarse particles significantly improves the rheological time of AC16 and SMA16, and enhances the resistance to permanent deformation of asphalt mixtures. The correlation between void fraction Q and η_1 is significant in AC16 structural parameters. In SMA16 structural parameters, coarse-grained area, void fraction, parameter Q and trend parameter Δ are significantly correlated with η_1 and η_2 . The increase of 4.75 passing rate reversed the change of the rheological time of AC16 and SMA16.

Keywords

Structural Parameters of Asphalt Mixture, Creep, Rheological Time, Permanent Deformation Resistance

沥青混合料结构参数与蠕变特性关系分析

刘海权¹, 纪 伦¹, 张 磊², 李 俊¹, 贺文栋^{1,3}

¹哈尔滨工业大学交通科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨

²中国路桥工程有限责任公司, 北京

³山西省交通科学研究院, 山西 太原

Email: jilunhit@126.com

收稿日期: 2018年2月28日; 录用日期: 2018年3月14日; 发布日期: 2018年3月21日

摘要

沥青混合料的结构影响其蠕变特性。为了研究沥青混合料结构参数与蠕变特性的关系,采用5种不同AC类及5种不同SMA类级配的沥青混合料进行蠕变试验和流变时间分析,并基于burgers模型进行分析,量化空间结构参数,探讨蠕变特性和结构参数的关系。试验结果表明,粗颗粒的增加都显著提高了AC16和SMA16沥青混合料的流变时间,增强了沥青混合料抗永久变形能力;AC16结构参数中,空隙率和 Q 与 η_1 相关性显著。SMA16结构参数中,粗颗粒面积、空隙率、参数 Q 以及趋向参数 Δ 与 η_1 和 η_2 显著相关;4.75通过率的增加使AC16和SMA16的流变时间变化趋势相反。

关键词

沥青混合料结构参数, 蠕变, 流变时间, 抗永久变形

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

沥青混合料结构和性能息息相关,粗集料对沥青混合料的高温力学性能影响较大,而沥青混合料的高温抗永久变形能力恰好是使用者重点关心的性能之一[1][2][3][4][5]。2003年,AASHTO推出了路面设计基本试验系统规范,SPT流变时间试验是其中基本性能试验之一。流变时间试验本质即单轴静载蠕变试验,研究表明,沥青混合料的流变时间与其抗变形能力具有很好的相关性,流变时间越大,抗变形能力越强[6]-[15]。因此,本文将借助单轴静载蠕变试验对不同的沥青混合料进行高温抗变形能力研究,通过流变时间来评价沥青混合料的抗变形能力,基于数字图像处理技术深入开展粗集料颗粒的细观形貌表征和沥青混合料结构参数的研究,进一步探讨沥青混合料性能,对研究沥青混合料进行抗变形能力有积极意义。

2. 试验材料及沥青混合料设计

2.1. 试验选用的级配

本文以工程中普遍使用的悬浮密实型的AC16级配和骨架密实型的SMA16级配作为研究级配。实验设计考虑模拟实际生产过程中粗集料级配的波动特点。以AC16中值级配J1为基础,保证各4.75及以下细集料筛孔通过率不变,在9.5通过率中值基础上分别增减 $\pm 5\%$ 、 $\pm 10\%$,并保证9.5以上各档粗集料之间比例不变,得到5个不同的AC16级配如表1所示,级配曲线图见图1。

以SMA16中值级配S1为基础,首先保证各4.75及以下细集料筛孔通过率不变,在9.5通过率中值基础上分别增减 $\pm 5\%$ 、 $\pm 10\%$,并保证9.5以上各档粗集料之间比例不变,得到5个不同的级配,如图2所示。本文所有试验试件成型采用的集料都先筛分成单档粒径,然后再进行回配。

2.2. 沥青用量

本文研究中,以中值级配沥青混合料的马歇尔设计方法确定的最佳油量,其他级配变化时均采用此油量,结果如表2所示。

Table 1. Pass rate of 5 kinds of gradation (J1 - J5)
表 1. J1~J5 矿料级配筛孔通过率

级配编号	通过下列筛孔(方孔筛/mm)的质量百分率/%										
	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
J2	100	96.7	89.3	80	48	34	24.5	17.5	12.5	9.5	6
J3	100	95.8	86.7	75	48	34	24.5	17.5	12.5	9.5	6
J1	100	95	84	70	48	34	24.5	17.5	12.5	9.5	6
J4	100	94.2	81.3	65	48	34	24.5	17.5	12.5	9.5	6
J5	100	93.3	78.7	60	48	34	24.5	17.5	12.5	9.5	6

Table 2. Gradation with the best asphalt value of the amount of asphalt
表 2. 级配中值沥青混合料最佳沥青用量

级配类型	沥青用量(%)	纤维用量(%)
AC16	4.5	0
SMA16	6.2	0.3

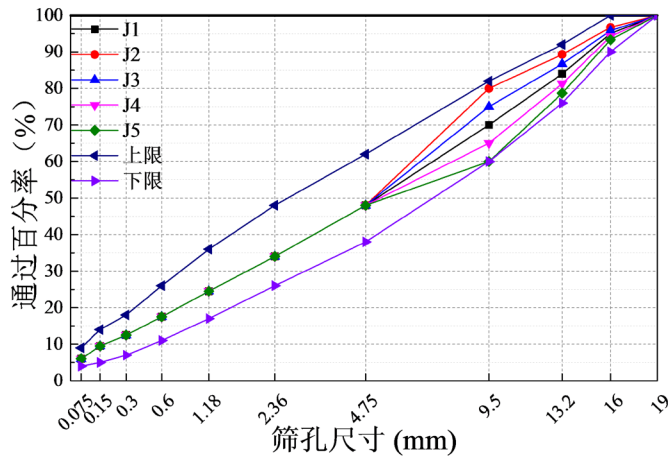


Figure 1. AC16 different coarse aggregate gradation curve
图 1. AC16 不同粗集料级配曲线图

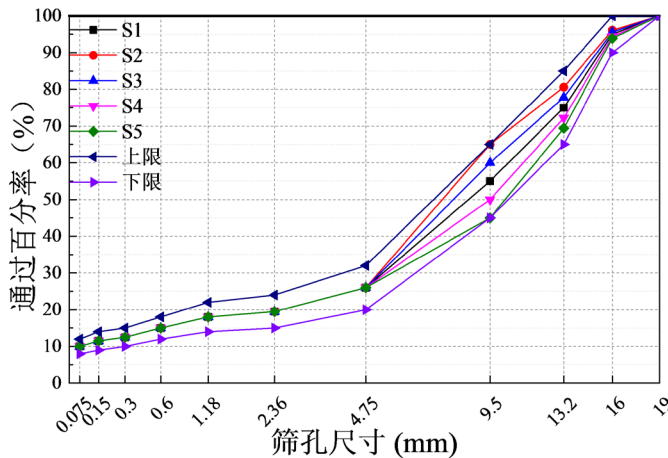


Figure 2. SMA16 different coarse aggregate gradation curve
图 2. SMA16 不同粗集料级配曲线图

3. 蠕变试验与结构参数

3.1. 蠕变试验和分析模型

1) 蠕变试验

采用单轴静载蠕变试验, 试验参照 AASHTO TP79 进行试验, 采用 UTM-250 伺服加载系统进行试验, 试验温度为 60℃, 试验荷载, AC16 采用 0.4 MPa, SMA16 采用 0.2 MPa。SPT 流变时间试验是 AASHTO 试验中基本性能试验之一。流变时间试验本质即单轴静载蠕变试验, 沥青混合料的流变时间与其抗变形能力具有很好的相关性, 流变时间越大, 抗变形能力越强。

沥青混合料的蠕变力学模型是多种多样的, Burgers 模型是当前应用较多的模型之一。Burgers 蠕变方程如式(1)所示:

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \left[\frac{1}{E_1} + \frac{1}{\eta_1} t + \frac{1}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_2 t}{\eta_2}} \right) \right] \quad (1)$$

式中 σ_0 ——加载应力(MPa);

E_1 ——瞬时弹性模量(MPa);

E_2 ——延迟弹性模量(MPa);

η_1, η_2 ——粘壶粘性系数。

2) 分析模型

Burgers 模型能很好的对蠕变曲线的迁移期和稳定期进行拟合, 但是不能就破坏期进行拟合。因此, 下文主要就蠕变曲线的前两个阶段进行拟合分析。蠕变曲线如图 3 所示。

3.2. 结构参数量化单位

1) 纵横比 AR_1 : 将集料颗粒最小外接矩形的长轴与短轴的比值称为纵横比 AR_1 , 如图 4, 定义式如式所示:

$$AR_1 = \frac{D_1}{D_2} \quad (2)$$

式中 D_1 ——最小外接矩形长轴(cm);

D_2 ——最小外接矩形短轴(cm)。

2) 棱角性: 棱角性的定义主要分为两类, 第一类是反映颗粒轮廓上棱角的圆度, 第二类是反映颗粒轮廓的整体轮廓的圆度。本文采用第二类基于颗粒周长计算的棱角性指标, 用颗粒实际周长与等效椭圆的周长的比值表征颗粒的棱角性[13], 如图 4 示意, 表达式如式(3)所示:

$$Angularity(P) = \left(\frac{Perimeter}{Perimeter_{ellipse}} \right)^2 \quad (3)$$

式中 $Perimeter$ ——集料颗粒周长(cm);

$Perimeter_{ellipse}$ ——等效椭圆周长(cm)。

3) 集料面积(Area): 集料面积可分为颗粒实际面积、等效椭圆面积和最小外接矩形面积 Area (Box) 等, 本文主要针对颗粒二维实际截面进行分析。

4) 分形维数(Fractal Dimension): 分形维数则是判断两个分形是否一致的度量标准之一。本文采用 IPP 测量分形维数, 采用变尺码法来进行分形维数的测定, 如图 5 所示, 具体如下:

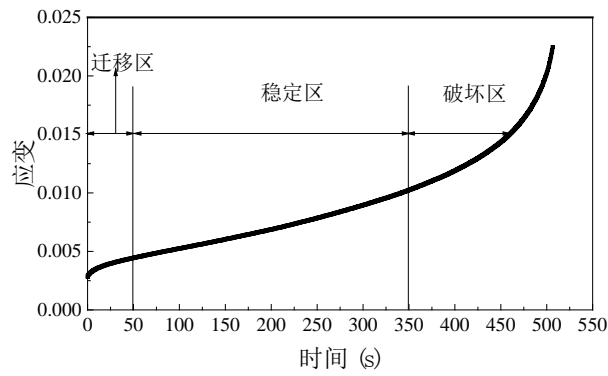


Figure 3. Schematic diagram of creep
图 3. 蠕变曲线示意图

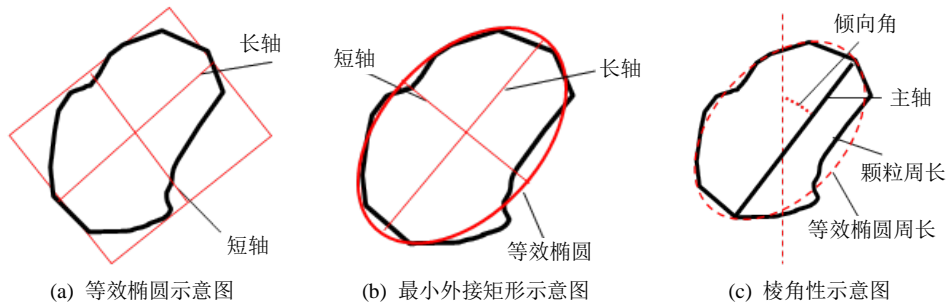


Figure 4. Coarse aggregate particle size parameters of the sketch map
图 4. 粗集料颗粒细观参数示意图

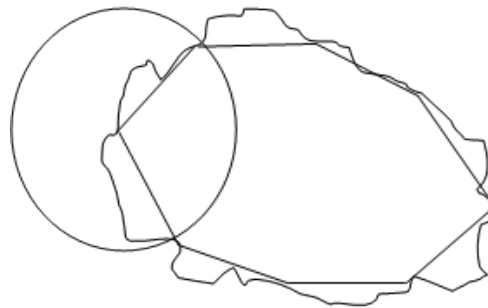


Figure 5. Fractal dimension solution diagram
图 5. 分形维数求解示意图

设定测量尺码为 ε ，让其沿着曲线(或图形边界)连续行走度量，如果度量步数为 N ，那么尺码与度量长度 L 之间具有如下的幂律关系：

$$L = k\varepsilon^{1-D} \tag{4}$$

对式(4)两边取对数有

$$\lg L = \lg k + (1-D)\lg \varepsilon \tag{5}$$

式中， k 为尺度常数。

用一组不同的尺码去测量曲线的长度，在双对数坐标中线性回归得到了直线的斜率 $\alpha = 1 - D$ ，从而分形维数 $D = 1 + \alpha$ 。

5) 空隙轮廓分形维数

每个独立空隙的轮廓均是由不规则的曲线构成, 为了定量描述空隙的轮廓特性, 故采用分形维数对空隙的轮廓进行评价。采用 IPP 具体测量空隙分形维数, 原理同上述。

6) 空隙面积比

由于沥青混合料的性能不仅受粗集料的影响, 同时还受空隙的影响。因此本节用集料面积和空隙面积的比值共同构建空隙面积参数如式(6)所示:

$$Q = \frac{Area_{jiliao}}{Area_{kongxi}} \quad (6)$$

式中 $Area_{jiliao}$ ——粗集料颗粒横断面积(cm^2);

$Area_{kongxi}$ ——空隙横断面积(cm^2)。

7) Eyad Masad [16]提出了集料偏角均值和颗粒趋向参数 Δ 表示集料颗粒偏角分布特性表达式见式(7)~(8)。

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum_{i=1}^N \alpha_k}{N} \quad (7)$$

$$\Delta = \frac{100}{N} \sqrt{\left(\sum_1^N \sin 2\alpha_k\right)^2 + \left(\sum_1^N \cos 2\alpha_k\right)^2} \quad (8)$$

式中 $\bar{\alpha}$ = ——主轴偏向角均值;

α_k ——单个颗粒主轴偏向角;

N ——颗粒个数。

Δ 表示主轴分布一致性, 数值在 0~100 之间, 分布一致性越高, 数值越大。

4. AC16 级配沥青混合料结构参数和性能分析

4.1. AC16 级配沥青混合料流变时间和蠕变特性

AC16 不同级配的沥青混合料流变时间和蠕变曲线如下

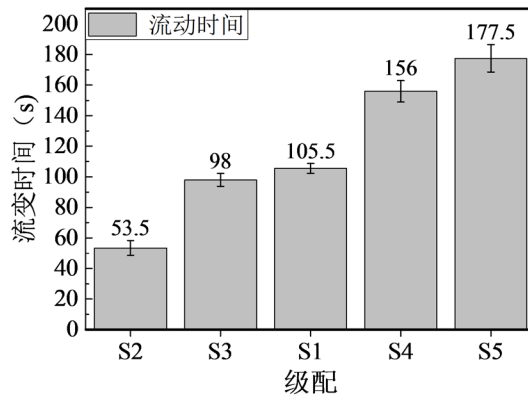
对比图 6 中 J1~J5 沥青混合料流变时间发现, 在试验所选择的 5 个级配中, 随着大颗粒粗集料比例的增加, 沥青混合料的流变时间增加明显。由 J2 到 J5 的变化过程中, 流变时间增加了 1 倍以上, 可见粗集料对于沥青混合料抗变形能力的贡献尤为重要。

由图 7 可见, AC16 的 5 个的沥青混合料试验蠕变曲线中, 其破坏时间点的由大到小的排列顺序是 J5-J4-J1-J3-J2。由前面级配参数可知, 在整体上破坏时间随着 9.5 及以上粗集料的增加而增加, 9.5 及以上粗集料的增加对于提高沥青混合料的高温变形能力具有重要意义。

对 AC16 的 5 种沥青混合料进行组成结构和流变时间的相关性分析, 相关系数计算结果见表 3。

4.2. AC16 沥青混合料结构参数与蠕变性能相关性分析

AC16 级配 J1~J5 沥青混合料结构参数和蠕变参数相关系数统计见表 4, 由表中数据可知, 结构参数除空隙分形维数外其他参数与 Burgers 蠕变模型参数和均具有很好的相关性, 与相关性次之, 最差。由此可知, 在 AC 类沥青混合料中, 集料颗粒面积的增加, 集料分形维数的降低, 空隙率的降低能够提高粘性、和, 提高其永久变能力。



J1~J5 (60°C, 0.4 MPa)

Figure 6. Different grades of asphalt mixture rheological time

图 6. 不同级配沥青混合料流变时间

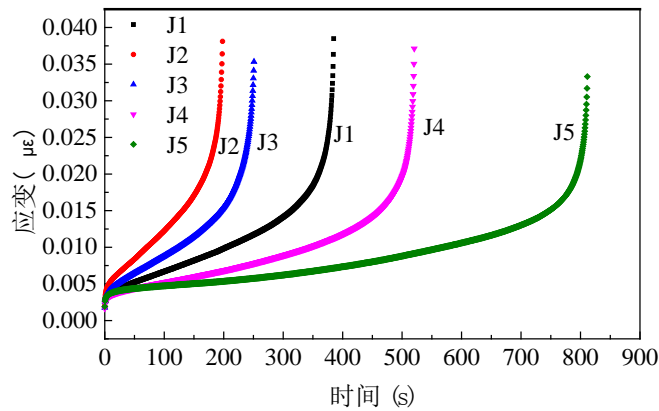


Figure 7. J1~J5 asphalt mixture creep curve

图 7. J1~J5 沥青混合料蠕变曲线

Table 3. AC16 asphalt mixture structure and rheological time correlation analysis

表 3. AC16 沥青混合料结构和流变时间相关性分析

混合料种类	面积(cm ²)	集料分形维数	空隙分形维数	AR ₁	空隙率(%)	Q
J1~J5	0.926**	-0.828*	0.620	0.956***	-0.859*	0.889*

注：“***”表示双侧 T 检验在 0.01 水平下显著相关；(下文同)“**”表示双侧 T 检验在 0.05 水平下显著相关；(下文同)“*”表示双侧 T 检验在 0.1 水平下显著相关；(下文同)。

Table 4. J1~J5 structural parameters and creep parameters correlation coefficient

表 4. J1~J5 结构参数与蠕变参数相关系数

混合料种类	面积(cm ²)	集料分形维数	空隙分形维数	AR ₁	空隙率(%)	Q
E ₁	0.329	-0.626	-0.273	0.134	-0.056	0.255
E ₂	0.913**	-0.933**	0.655	0.516	-0.697	0.732
η ₁	0.745	-0.588	0.739	0.319	-0.754	0.706
η ₂	0.913**	-0.866*	0.742	0.470	-0.788	0.799

5. SMA16 级配沥青混合料结构参数和性能分析

5.1. SMA16 级配沥青混合料流变时间和蠕变特性

SMA16 不同粗集料级配沥青混合料流变时间和蠕变曲线统计结果如下:

由图 8 发现, 随着 9.5 及以上粗集料的含量增加, 从 S2 到 S5 的变化过程中, 沥青混合料的流变时间在整体上逐渐增加。S5 与 S2 相比, 流变时间由 53 s 增加到了 177.5 s, 流变时间增加了 200%, 再次证明了粗集料的用量会极大程度影响着沥青混合料的高温抗变形能力。

由图 9 可知, 随着 9.5 及以上粗集料比例逐渐增加时, 沥青混合料的蠕变破坏时间点逐渐增大, 蠕变速率逐渐降低。

SMA16 沥青混合料结构参数和流变时间的相关系数计算统计见表 5。

由表 5 可知, 在 S1~S5 中, 沥青混合料断面颗粒面积的增加, 集料分形维数的降低, 空隙分形维数的增加, 空隙率的减少, 趋向参数 Δ 的增大均能显著提高流变时间, 提高沥青混合料的抗永久变形能力。出现这种现象的原因是由于随着 4.75 mm 通过率的增加, SMA 沥青混合料的骨架结构逐渐被破坏, 沥青混合料逐渐变成了悬浮密实型沥青混合料。由前面试验结果发现, 在蠕变试验中, 相同荷载前提下, 密实悬浮型沥青混合料流变时间更久, 因此导致了结构参数规律出现相反变化规律。

5.2. SMA16 沥青混合料结构参数与蠕变性能相关性分析

S1~S5 沥青混合料结构参数和蠕变参数相关系数统计见表 6。

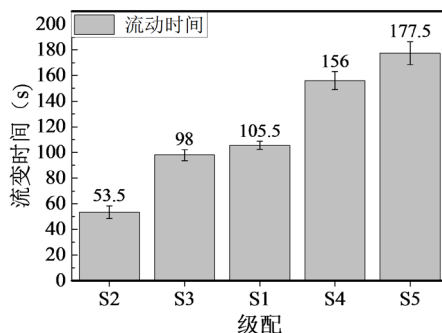


Figure 8. Different grades with asphalt mixture rheological time

图 8. 不同级配沥青混合料流变时间

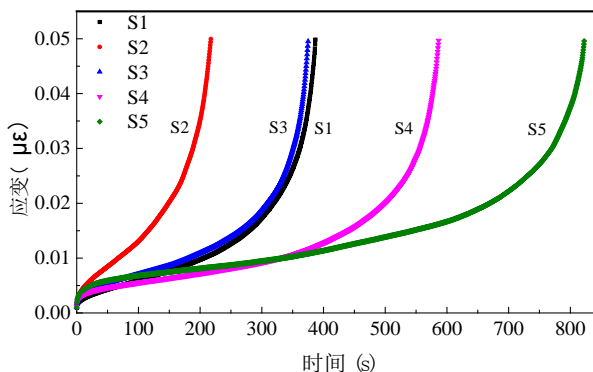


Figure 9. S1~S5 asphalt mixture creep curve

图 9. S1~S5 沥青混合料蠕变曲线

Table 5. SAM-16 Asphalt Mixture Structure and Rheological Correlation Analysis
表 5. SAM-16 沥青混合料结构和流变时间相关性分析

混合料种类	面积(cm ²)	集料分形维数	空隙分形维数	棱角性	空隙率(%)	Q	横向 Δ	纵向 Δ
S1~S5	0.967 ^{***}	-0.740	-0.881 ^{**}	-	-0.979 ^{***}	0.865 [*]	0.991 ^{***}	0.853 [*]

Table 6. S1~S5 structural parameters and creep parameters correlation coefficient
表 6. S1~S5 结构参数与蠕变参数相关系数

混合料种类	面积(cm ²)	集料分形维数	空隙分形维数	空隙率(%)	Q	横向 Δ	纵向 Δ
E_1	-0.216	0.650	0.864 [*]	0.335	-0.641	-0.364	-0.235
E_2	-0.419	-0.008	0.526	0.21	-0.778	-0.275	0.069
η_1	0.951 ^{**}	-0.712	-0.581	-0.943 ^{**}	0.926 ^{**}	0.964 ^{***}	0.780
η_2	0.881 ^{**}	-0.448	-0.649	-0.810 [*]	0.808 [*]	0.840 [*]	0.561

结构参数与 Burgers 蠕变模型参数 η_1 具有很好的相关性, η_2 次之, 与 E_1 和 E_2 相关性均较差。说明选取的结构参数能够间接反映沥青混合料的抗永久变形能力, 粗颗粒面积越大, 集料分形维数越小、空隙率越小、趋向参数越大, 沥青混合料抗永久变形能力越强。

6. 结论

基于蠕变试验开展了沥青混合料抗变形能力和黏弹特性的研究, 并采用偏相关分析法对沥青混合料结构和性能建立了联系, 获得成果如下:

1) 试验结果表明, 蠕变试验试件的破坏形式为“两端细、中间粗”的鼓状破坏形式, AC16 试件表面有较多的条状裂纹, SMA 则表现为粗骨料之间互相错位。

2) 粗集料级配对沥青混合料流变时间具有显著影响, 无论是 AC 类还是 SMA 类沥青混合料, 大颗粒粗颗粒的增加都显著提高了沥青混合料的流变时间, 增强了沥青混合料抗永久变形能力。

3) 在 AC16 中, 4.75 mm 通过率的降低使得流变时间降低, 但对于 SMA16 来说, 4.75 mm 通过率的增加使得流动时间大大增加, 与 AC16 呈现相反趋势。

4) AC16 沥青混合料中, 粗集料大颗粒的增加主要对蠕变参数 η_1 和 η_2 产生了影响, 4.75 通过率的降低使得 η_1 和 η_2 都增大, 空隙率和 Q 与 η_1 相关性显著。SMA16 沥青混合料中, 粗集料大颗粒的增加使得 η_1 和 η_2 都增大, 粗颗粒面积、空隙率、参数 Q 以及趋向参数 Δ 与 η_1 和 η_2 显著相关。空隙率与 η_1 负相关显著, 参数 Q 与 η_1 正相关显著。

5) 抗永久变形性能与粗集料面积参数、空隙分形维数、横向 Δ 、纵向 Δ 、空隙率以及 Q 相关性良好。

参考文献

- [1] 谭忆秋. 沥青与沥青混合料[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2007: 52-54.
- [2] 卢永贵, 张登良. 粗集料空隙率试验研究[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2001, 21(1): 33-36.
- [3] 吴旷怀, 张肖宁. 沥青混合料设计综述[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2005, 4(5): 456-461.
- [4] 徐慧宁. 体积指标对沥青混合料路用性能的影响[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [5] 贾渝. Superpave 混合料设计方法最新进展[J]. 中外公路, 2001, 21(6): 58-61.
- [6] ASTM D3398-2000. Test Method for the Index of Aggregate Particle Shape and Texture. Annual Book of ASTM (American Society for Testing and Materials) Standards, 2000.
- [7] Rao, C., Tutumluer, E. and Kim, I.T. (2002) Quantification of Coarse Aggregate Angularity Based on Image Analysis.

Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, **1787**, 117-124.

<https://doi.org/10.3141/1787-13>

- [8] 陈国明. 沥青混合料中粗集料表面物理特性的研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005.
- [9] Chen, J.S., Wong, S.Y. and Lin, K.Y. (2005) Quantification of Movements of Flat and Elongated Particles in Hot Mix Asphalt Subject to Wheel Load Test. *Materials and Structures*, **38**, 395-402. <https://doi.org/10.1007/BF02479307>
- [10] Delrio-Prat, M., Vega-Zamanillo, A., Castro-Fresno, D., *et al.* (2011) Energy Consumption during Compaction with a Gyrotory Intensive Compactor Tester. Estimation Models. *Construction & Building Materials*, **25**, 979-986. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.083>
- [11] Buchanan, M.S. (2000) Evaluation of the Effect of Flat and Elongated Particles on the Performance of Hot Mix Asphalt Mixtures. *Coarse Aggregates*.
- [12] 陈建旭, 林桂仪, 陈虹洁. 粒料对沥青混凝土性能之影响[C]. 全国公路科技创新高层论坛, 2004: 2-9.
- [13] 谭忆秋, 宋宪辉, 纪伦, 等. 粗集料性能对沥青混合料高温性能的影响[J]. 中国公路学报, 2009(1): 29-33.
- [14] 彭波. 沥青混合料集料几何特性与结构研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 长安大学道路与铁道工程, 2008.
- [15] 赵永利, 黄晓明. 矿料级配基本性能的试验研究[J]. 公路交通科技, 2004, 21(6): 1-3.
- [16] Masad, E., Muhunthan, B., Shashidhar, N., *et al.* (1999) Quantifying Laboratory Compaction Effects on the Internal Structure of Asphalt Concrete. *Transportation Research Record*, **1**, 185-197.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3431, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ojtt@hanspub.org