

文章编号:1671-8879(2015)02-0013-06

# 沥青混合料动水破坏行为与动力渗水试验模拟

蔡燕霞<sup>1,2</sup>, 申爱琴<sup>1</sup>, 郭寅川<sup>1</sup>, 王德强<sup>1</sup>

(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. 河北省交通规划设计院, 河北 石家庄 050011)

**摘要:**针对沥青混合料动力渗水研究的不足,揭示沥青混合料动力渗水行为,采用快速 Lagrange 有限差分法对沥青路面的动水破坏行为进行数值模拟;利用自行研发的多功能沥青混合料动态渗水试验仪对 AC-13 与 AC-20 沥青混合料进行动力渗水试验,探讨了 2 种沥青混合料空隙率与渗水系数的关系。研究表明:动水产生的泵吸作用是沥青路面水损坏的诱因;动力渗水系数随空隙率(或水压力)的增加逐渐增大,最终趋于稳定;对动力渗水试验数据进行回归,得到了 AC-13 与 AC-20 这 2 种混合料动力渗水系数与水压力、空隙率的关系;与静力渗水系数相比,动力渗水系数更符合试验结果,建议将 31~40 mL/s 的动力渗水系数作为沥青混合料渗水的临界评价指标。

**关键词:**道路工程;沥青混合料;试验研究;动力渗水;空隙率;水压

**中图分类号:**U416.217

**文献标志码:**A

## Dynamic water damage behavior and dynamic seepage test for asphalt mixture

CAI Yan-xia<sup>1,2</sup>, SHEN Ai-qin<sup>1</sup>, GUO Yin-chuan<sup>1</sup>, WANG De-qiang<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Special Area Highway Engineering of the Ministry of Education, Chang'an University,

Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Hebei Provincial Communications Planning and Design Institute,

Shijiazhuang 050011, Hebei, China)

**Abstract:** In order to make up the deficiencies in studies of the dynamic water seepage of asphalt mixture, and reveal the behavior of dynamic water seepage of asphalt mixture, the hydrodynamic destruction behavior of asphalt pavement was simulated by using the fast Lagrangian finite difference method. Then a self-developed dynamic multi-function asphalt water seepage tester was used to do the water seepage test for AC-13 and AC-20 asphalt mixture, and the relationship between the voids in asphalt mixtures and water permeability was discussed. The results show that: the reason of asphalt pavement water damage is the pumping effect caused by the hydrodynamic pressure; dynamic water seepage coefficient increases as porosity power (or water pressure) increases, and ultimately tends to be stable; the regression of the dynamic seepage test data is carried out, and the relationship between dynamic water seepage coefficient and water pressure and porosity of AC-13 and AC-20 asphalt mixture is showed; compare with static water seepage coefficient, the dynamic seepage coefficient is more realistic. Thus the dynamic seepage

收稿日期:2014-03-10

基金项目:广东省交通运输厅 2008 年科技项目(2008-13)

作者简介:蔡燕霞(1984-),女,河北石家庄人,河北省交通规划设计院工程师,长安大学工学博士研究生,E-mail:saloloo@sina.com。

coefficient 31-40 mL/s is recommended as a critical evaluation of the seepage of asphalt mixture. 4 tabs, 7 figs, 17 refs.

**Key words:** road engineering; asphalt mixture; experimental study ;dynamic water seepage; porosity; water pressure

0 引言

沥青混合料的透水性是一个非常重要却常常被忽视的问题。文献[1]研究表明:影响沥青混合料透水性的主要因素是空隙率,沥青混合料空隙率小于4%~5%时,其空隙相互不连通,内部不进水;空隙率为5%~8%时,混合料空隙部分连通,其基本不透水;空隙率为8%~12%时,水可以大量渗入混合料内部空隙,而由于水不能自由流动使其不宜挥发;当空隙率大于12%时,混合料内部空隙相互连通,水可以自由流动。

但上述结论是基于静水条件下得出,没有考虑动水压力的作用。文献[2-3]研究表明:饱水沥青路面在周期行车荷载作用下,路面空隙中的水不断产生正水压力和真空负压的循环泵吸作用,是沥青路面水损坏的诱因。但是,目前基本没有动水压力的实测数据,文献[4]虽做过尝试,但因为数据采样频率太低使测得的值并非是动水压力峰值;文献[5]在60℃高温条件下采用动水压力定向冲刷模式,对沥青混凝土进行了抗水损性能研究,发现空隙率在8%左右的沥青混合料抗水损害性能最差,但试验未给出不同空隙率情况下沥青混合料动力渗水变化规律;文献[6-9]虽然都对饱水沥青路面的动水行为进行了数值模拟分析,得出动空隙水压力随车速的增大而增大,最大值出现在面层底部的结论。但都是基于力学分析方法,并未结合试验对沥青混合料的动力渗水提出一个定量的概念。为此,本文将首先采用快速 Lagrange 有限差分法对沥青路面的动水破坏行为进行模拟,然后利用自行研发的多功能沥青混合料动态渗水试验仪,对动水压力作用下的沥青混合料空隙率与渗水系数的关系进行研究。

1 动水破坏行为模拟

1.1 模型及计算参数

采用中国典型的路面结构进行分析,其中上面层采用 AC-13 型沥青混凝土,中面层采用 AC-20 型沥青混凝土,下面层采用 AC-25 型沥青混凝土,渗透系数参考文献[10]。各层材料力学参数见表 1。

表 1 各层材料的力学参数

Tab. 1 Mechanics parameters of all layers

| 结构层   | 几何尺寸/m |   |      | 密度/<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) | 弹性模量/<br>MPa | 泊松比  | 渗透系数/<br>(cm·s <sup>-1</sup> ) |
|-------|--------|---|------|------------------------------|--------------|------|--------------------------------|
|       | 长      | 宽 | 高    |                              |              |      |                                |
| AC-13 | 8      | 6 | 0.04 | 2.70                         | 1 400        | 0.25 | 1.0×10 <sup>-6</sup>           |
| AC-20 | 8      | 6 | 0.06 | 2.51                         | 1 000        | 0.25 | 1.0×10 <sup>-5</sup>           |
| AC-25 | 8      | 6 | 0.08 | 2.46                         | 1 000        | 0.25 | 1.0×10 <sup>-5</sup>           |
| 基层    | 8      | 6 | 0.32 | 2.20                         | 1 500        | 0.30 |                                |
| 底基层   | 8      | 6 | 0.18 | 1.99                         | 800          | 0.35 |                                |

1.2 荷载与边界

在路面计算力学中,通常将轮载简化为位置不变的双圆均布垂直荷载,轮载当量圆半径为 10.65 cm。据文献[10-11],单次轮载  $P$  随时间  $t$  的变化如图 1 所示。

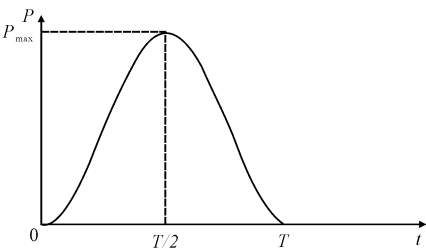


图 1 轮载的加卸载历程曲线

Fig. 1 Load and unload time history curve of wheel load

$$\left. \begin{aligned} P &= P_{\max} \sin^2\left(\frac{\pi}{T}t\right) & 0 \leq t \leq T \\ P &= 0 & t > T \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $P_{\max}$  为均布轮载的峰值, $P_{\max} = 0.7 \text{ MPa}$ ;  $T$  为单车载的作用时间,与车速成反比,当车速为 80 km/h 时,等效的  $T$  约为 0.045 s<sup>[10]</sup>;  $t$  为时间。

1.3 计算结果

计算时基于 Biot 固结方程,并将沥青混和料看作多孔介质,同时考虑了它和水体的惯性力及两者之间的耦合作用,采用快速 Lagrange 有限差分法对沥青混合料进行分析。轮隙中心正下方空隙水压力的长消规律如下页图 2 所示。动水压力先增大后减小,降到动水压力为 0 MPa 后转化为负水压力,在达到负峰值后,动水压力逐渐趋于 0 MPa,转化为静水压力。这一过程真实反映了行车荷载作用下饱水沥青路面内先后产生正动水压力和真空负压的泵吸作用过程<sup>[12-13]</sup>。同时,动水压力沿路面深度逐渐增

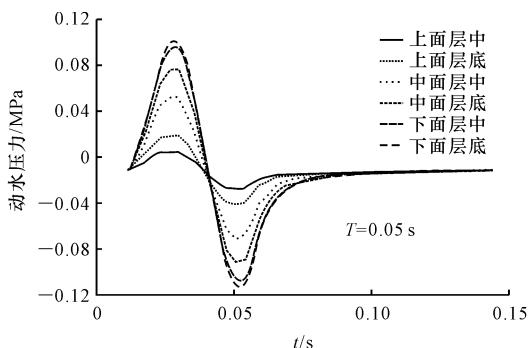


图 2 空隙水压力的长消规律

Fig. 2 Development and dissipation of dynamic pore water pressure

大,但增大速率越来越慢,最大动水压力出现在下面层底部。

由此可以看出,水进入到沥青层内部微小空隙或微裂缝处时,每次车辆经过时都会产生一次泵吸作用,高压水的反复泵吸作用将会对沥青膜与集料接触面上产生不断的冲刷与置换作用,车速越快,作用越大,特别是在高温季节由于沥青胶结料粘聚力降低,集料与沥青胶结料的粘结界面更加难以抵抗空隙水压的反复作用<sup>[10]</sup>;于是水分逐步浸入到集料与沥青胶结料的接触界面或沥青胶结料内部,使沥青胶结料破损、脱落并被冲出路面,相互之间失去粘结力的集料被高速旋转的车轮带走,最终形成坑槽等水损坏现象<sup>[14-15]</sup>。

## 2 动力渗水试验设计

通过对沥青路面动水破坏行为模拟分析可以看出,动水是沥青路面水损坏产生的诱因,而现行规范并没有针对水损害的混合料设计指标。下面通过试验研究动水压力作用下沥青混合料空隙率与渗水系数的关系。

### 2.1 试验仪器

为了模拟车辆荷载作用下动水压力对混合料的泵吸作用,研制了“多功能沥青混合料动态渗水试验仪”(发明专利号 201010231501.2)。该仪器的主要功能是测量正负压力作用下混合料的渗水系数,可选用大、小马歇尔试件或路面取芯试件进行试验,试验时最大渗水量可达 5 L,正负压力量程均为 0~2 MPa。试验仪器示意图如图 3 所示。

### 2.2 试验方案

(1)对 AC-13 和 AC-20 这 2 种混合料进行动力渗水研究,2 种混合料级配曲线均取规范中值,通过

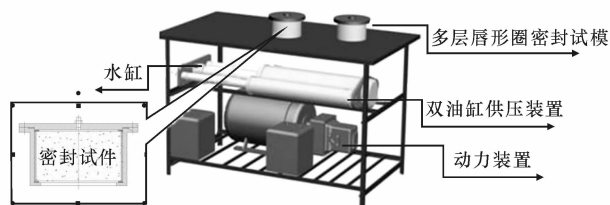


图 3 多功能沥青混合料动态渗水试验仪示意图

Fig. 3 Multi-function asphalt mixture dynamic seepage tester schematic

马歇尔方法确定最佳沥青用量。

(2)按照最佳油石比,通过控制不同的击实次数分别成型空隙率为 2.5%、3.0%、3.5%、4.0%、4.5%、5.0%、5.5%、6.0%、7.0%、8.0% 的马歇尔试件,每种空隙率平行成型 25 个试件。

(3)表干法测定各组每个试件的实际空隙率,剔除误差较大的试件,每一空隙率应有 20 个符合条件的试件,每一压力条件下做 2 个试件。

(4)对各组试件进行动力渗水试验。分别测定在水压为 0.1~1.0 MPa 时单位时间内渗入试件的水量,单位为 mL/s。试验时最大渗水量为 5 L,最长试验时间为 5 min,对空隙率小的试件采用时间控制模式,对空隙率大的采用水量控制模式。试验过程中观察试件的透水情况,记录试件是否贯通。

(5)另外按照最佳油石比通过控制不同的轮碾次数,成型空隙率为 2.5%、3.0%、3.5%、4.0%、4.5%、5.0%、5.5%、6.0%、7.0%、8.0% 的车辙板试件,按《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)的要求,采用路面渗水仪测定无水压力条件下不同空隙率的渗水系数作为参照。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 动力渗水系数 $p$

动力渗水系数的概念定义为:在一定压力下,单位时间内渗入试件的水量(mL/s)。通过观察动力渗水试验,将试件的渗水情况分为 4 类:未贯通(不渗水),轻微贯通(少量渗水)、部分贯通(大量渗水)、严重贯通(严重渗水)的情况。

AC-13、AC-20 这 2 种沥青混合料动力渗水系数试验结果如下页表 2、表 3 所示。

根据表 2、表 3 绘制动水压力系数影响因素的关系图及静水压力系数曲线图,见下页图 4~图 7,结合图 4~图 7 得出结论如下所述。

(1)如图 4(a)、图 5(a)所示,当水压力在

表 2 AC-13 沥青混合料在不同空隙率水/压力条件下的动力渗水系数

| 空隙率/% | 不同水压力(MPa)的动力渗水系数/(mL·s <sup>-1</sup> ) |      |      |      |      |      |      |      |      |      | 静力渗水系数/<br>(mL·min <sup>-1</sup> ) |
|-------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------------------------------------|
|       | 0.1                                     | 0.2  | 0.3  | 0.4  | 0.5  | 0.6  | 0.7  | 0.8  | 0.9  | 1.0  |                                    |
| 2.5   | 0                                       | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0                                  |
| 3.0   | 0                                       | 0    | 0    | 2.3  | 3.4  | 4.9  | 8.0  | 11.9 | 13.7 | 16.3 | 0                                  |
| 3.5   | 4.3                                     | 5.3  | 7.9  | 9.3  | 11.5 | 15.0 | 17.1 | 20.8 | 24.5 | 27.9 | 0                                  |
| 4.0   | 7.9                                     | 13.5 | 20.8 | 24.3 | 30.1 | 38.3 | 44.0 | 46.9 | 48.2 | 49.7 | 0                                  |
| 4.5   | 12.2                                    | 19.8 | 26.0 | 29.9 | 35.1 | 44.3 | 48.1 | 52.2 | 53.4 | 54.0 | 7                                  |
| 5.0   | 16.5                                    | 26.1 | 31.2 | 35.5 | 40.1 | 48.3 | 52.1 | 57.4 | 58.6 | 59.2 | 17                                 |
| 5.5   | 23.1                                    | 27.2 | 33.5 | 37.2 | 41.2 | 49.2 | 56.4 | 58.6 | 59.7 | 60.0 | 38                                 |
| 6.0   | 29.2                                    | 30.9 | 35.0 | 38.2 | 42.6 | 51.5 | 58.2 | 60.9 | 63.2 | 65.0 | 83                                 |
| 7.0   | 29.9                                    | 33.5 | 36.4 | 39.1 | 43.9 | 53.8 | 60.0 | 63.1 | 66.6 | 67.3 | 134                                |
| 8.0   | 33.3                                    | 35.5 | 41.2 | 43.6 | 50.3 | 59.8 | 66.2 | 66.6 | 67.3 | 68.6 | 264                                |
| 9.0   | 43.2                                    | 45.1 | 48.8 | 50.2 | 57.1 | 63.0 | 67.0 | 68.4 | 69.2 | 70.1 | 401                                |

表 3 AC-20 沥青混合料在不同空隙率水/压力条件下的动力渗水系数

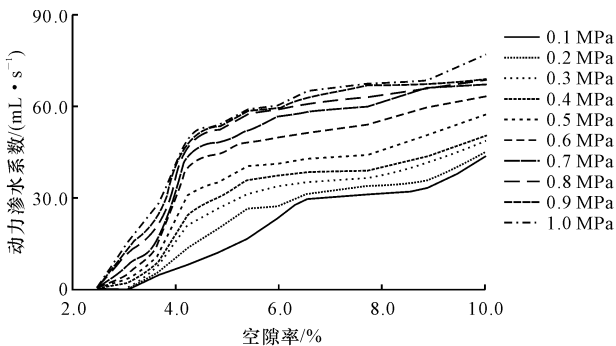
| 空隙率/% | 不同水压力(MPa)的动力渗水系数/(mL·s <sup>-1</sup> ) |      |      |      |      |      |      |      |      |      | 静力渗水系数/<br>(mL·min <sup>-1</sup> ) |
|-------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------------------------------------|
|       | 0.1                                     | 0.2  | 0.3  | 0.4  | 0.5  | 0.6  | 0.7  | 0.8  | 0.9  | 1.0  |                                    |
| 2.5   | 0                                       | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0                                  |
| 3.0   | 0                                       | 0    | 1.9  | 4.2  | 6.2  | 9.1  | 12.5 | 15.1 | 17.0 | 21.5 | 0                                  |
| 3.5   | 4.3                                     | 5.6  | 8.6  | 12.5 | 15.9 | 20.8 | 21.0 | 24.3 | 28.5 | 29.6 | 0                                  |
| 4.0   | 11.2                                    | 16.8 | 20.3 | 25.6 | 30.4 | 37.5 | 45.2 | 47.6 | 48.8 | 50.0 | 3                                  |
| 4.5   | 17.1                                    | 26.5 | 31.6 | 35.9 | 40.5 | 48.7 | 52.5 | 57.8 | 59.0 | 55.2 | 11                                 |
| 5.0   | 19.1                                    | 27.6 | 33.9 | 37.6 | 41.6 | 49.6 | 56.8 | 59.0 | 60.1 | 60.0 | 25                                 |
| 5.5   | 24.9                                    | 30.9 | 36.8 | 39.5 | 44.3 | 54.2 | 60.4 | 63.5 | 67.0 | 67.3 | 74                                 |
| 6.0   | 28.1                                    | 31.9 | 36.4 | 41.0 | 50.7 | 56.2 | 64.6 | 64.1 | 67.7 | 68.6 | 148                                |
| 7.0   | 31.9                                    | 34.4 | 36.2 | 41.6 | 51.6 | 59.6 | 65.4 | 66.9 | 69.5 | 69.9 | 301                                |
| 8.0   | 36.4                                    | 38.9 | 46.4 | 49.1 | 55.7 | 60.2 | 66.6 | 67.0 | 69.7 | 72.7 | 473                                |
| 9.0   | 44.3                                    | 48.5 | 52.2 | 55.6 | 57.5 | 63.4 | 67.4 | 69.8 | 72.6 | 79.3 | 638                                |

0.1~0.4 MPa时,动力渗水系数随着空隙率的增大而增大,且增长的速率逐渐减小;当空隙率超过8%时动力渗水系数逐渐趋于稳定;而当水压力在0.5 MPa及以上时,动力渗水系数同样随着空隙率的增大而增大,而增长率先减小后又增大。产生原因是:当水压力小于0.4 MPa时,空隙率的增大混合料内部的贯通孔不再增加,渗水能力不再增加;而当水压力大于0.5 MPa时,先是由于空隙率的增加混合料内部的贯通孔不再增加,渗水能力趋于稳定;当空隙率超过8%时,可能由于水压力导致混合料贯通孔增加。

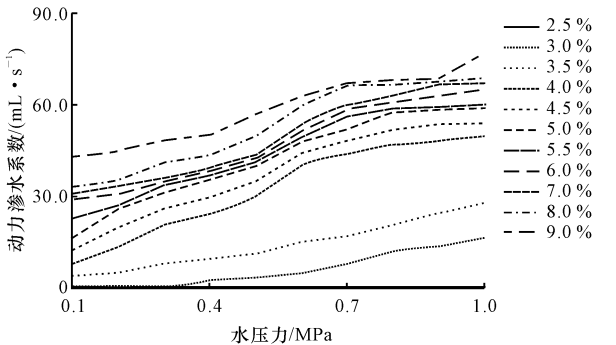
(2)如图4(b)、图5(b)所示,当空隙率为2.5%时,动力渗水系数为0;当空隙率为3.0%~3.5%时,动力渗水系数随着水压力的增大而增大;当空隙率大于3.5%时,动力渗水系数随水压力的增大而增大,且增长的速率越来越小,增大到一定程度也趋

于稳定。产生原因是:高压水渗入到集料与沥青膜的接触界面,与沥青膜产生置换作用,使沥青膜破损,从而导致部分封闭空隙被贯通,当贯通孔数量一定时,渗水能力趋于稳定。

(3)如下页图6、图7所示,对于AC-13沥青混合料:当空隙率为7%时,渗水系数为134 mL/min,已经大于120 mL/min(即大于2 mL/s),可以看出试件已经大量渗水,对比AC-13动力渗水试验,不论水压力多少,当空隙率大于5%后,试件都已经开始大量或者严重渗水。而AC-20沥青混合料当空隙率为6%时,渗水系数为148 mL/min,已经大于120 mL/min,可以看出试件开始大量渗水。对比AC-20动力渗水试验,不论水压力为多少,当空隙率大于4.5%~5.0%后,试件基本都已经大量或严重渗水。因此,现行规范中的静力渗水试验不能准确地评价混合料的渗水能力。



(a) 不同水压力条件下空隙率与动力渗水系数关系



(b) 不同空隙率条件下水压力与动力渗水系数关系

图 4 AC-13 混合料动力渗水系数影响因素关系

Fig. 4 Influencing factors diagram of dynamic water seepage coefficient for AC-13 asphalt mixture

(4)比较表 2、表 3 可知,在同一空隙率条件下或者同一水压力条件下,AC-20 的动力渗水系数及静力渗水系数较 AC-13 的都大。也就是说,大粒径的沥青混合料渗水系数要大于小粒径沥青混合料的渗水系数,而渗水系数是反映水在沥青混合料内部水流渗透的情况,与混合料内部空隙连通状况有关。AC-20 混合料集料颗粒比 AC-13 颗粒大,容易离析<sup>[16]</sup>,从而导致密实性和均匀性比 AC-13 差,而且 AC-20 沥青用量比 AC-13 沥青用量小,因此在动水压力作用下空隙更容易贯通。

3.2 动力渗水系数等级划分

为了对沥青混合料的抗动力渗水能力进行评价,根据试验中试件的实际渗水情况,将动力渗水系数分为 4 个等级,如表 4 所示。

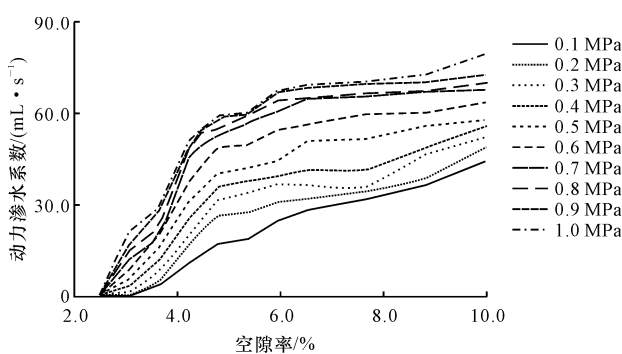
表 4 动力渗水系数等级

Tab. 4 Dynamic water seepage coefficient scale

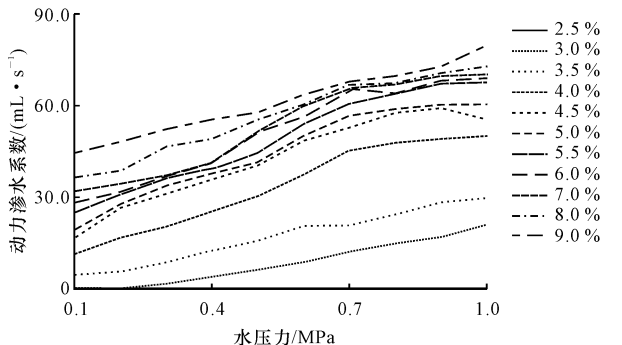
| 等级         | I    | II    | III   | IV    |
|------------|------|-------|-------|-------|
| 动力渗水系数 $p$ | 0~10 | 11~30 | 31~40 | 41~80 |
| 渗水程度       | 几乎不  | 轻微    | 中等    | 严重    |

3.3 动力渗水系数回归分析

为了对动力渗水系数与混合料空隙率、水压力值进行量化研究,采用数据分析软件 Origin8.0,根



(a) 不同水压力条件下空隙率与动力渗水系数关系



(b) 不同空隙率条件下水压力与动力渗水系数关系

图 5 AC-20 混合料动力渗水系数影响因素关系

Fig. 5 Influencing factors diagram of dynamic water seepage coefficient for AC-20 asphalt mixture

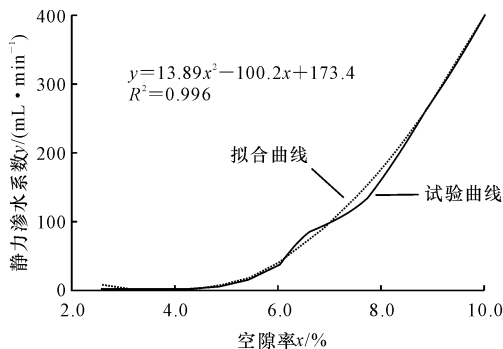


图 6 AC-13 静力渗水系数曲线

Fig. 6 Static water seepage coefficient curve for AC-13

据表 2、表 3 的数据进行回归,得到 AC-13 与 AC-20 动力渗水系数回归方程为

$$y_{13} = 13.73x_1 + 2\,544.277x_2 - 18\,203.695x_2^2 + 527.747x_1x_2 - 63.781 \quad (2)$$

$$y_{20} = 12.144x_1 + 2\,997.759x_2 - 22\,419.262x_2^2 + 575.775x_1x_2 - 72.035 \quad (3)$$

式中: $y_{13}$  为 AC-13 沥青混合料动力渗水系数 (mL/s); $y_{20}$  为 AC-20 沥青混合料动力渗水系数 (mL/s); $x_1$  为水压力值 (MPa); $x_2$  为空隙率 (%)。

将静力渗水系数单位换算为 mL/s,回归得静力渗水系数与空隙率的关系式为

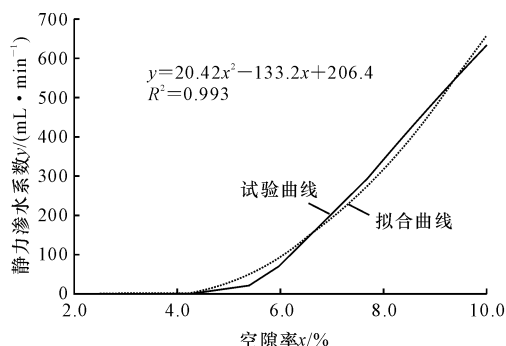


图7 AC-20 静力渗水系数曲线

Fig. 7 Static water seepage coefficient curve for AC-20

$$y'_{13} = 2315.4x^2 - 167.02x + 2.8909 \quad (4)$$

$$y'_{20} = 3404.2x^2 - 222.02x + 3.4406 \quad (5)$$

式中:  $y'_{13}$  为 AC-13 沥青混合料动力渗水系数 (mL/s);  $y'_{20}$  为 AC-20 沥青混合料动力渗水系数 (mL/s);  $x$  为空隙率 (%)。

根据上述公式,当混合料的空隙率和路表面动水压力的大小已知时,可以根据公式对 AC-13、AC-20 混合料铺筑路面的渗水情况或可能的渗水能力进行预估,同时在施工过程中要求严格控制集料的级配(尤其是通过 0.075 mm 筛孔的质量百分率)和沥青用量变化,控制沥青混合料的级配和温度离析,以防局部现场空隙率过大,并采用合适的工艺提高压实度,减少现场空隙率<sup>[17]</sup>。

## 4 结 语

(1) 水压的产生和消散在轮载作用过程中同时存在,导致面层内正负水压力随时间交替出现,车速越快,水压力越大,正负压力的交替频率越高,对沥青路面产生的冲刷破坏作用越大,说明空隙水压力反复泵吸作用是沥青路面水损坏产生的诱因。

(2) 当水压力值(或空隙率)一定时,动力渗水系数随空隙率(或水压力)的增大而增大,且增长的速度越来越小,增大到一定程度趋于稳定,这时沥青混合料的未连通空隙已基本被贯穿。

(3) 通过动力渗水试验,发现动水作用下 AC-13 和 AC-20 分别在空隙率为 5.0% 和 4.5% 时出现大量渗水;而当静力渗水试验,AC-13 和 AC-20 的空隙率达到 7.0% 和 6.0% 时,其渗水系数才超过 120 mL/min。

(4) 为了评价混合料的抗渗水能力,按照试件的实际渗水情况和动力渗水系数的关系,将动力渗水系数分为 4 个等级,并建议将 31~40 mL/s 作为沥青混合料渗水的临界评价指标。

(5) 对试验数据进行回归,得到了 AC-13 与 AC-20 这 2 种混合料动力渗水系数与水压力、空隙率的关系,以便于指导混合料设计。

## 参考文献:

## References:

- [1] 孙立军. 沥青路面结构行为理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.  
SUN Li-jun. Structural behavior for asphalt pavement [M]. Beijing: China Communications Press, 2005. (in Chinese)
- [2] 申爱琴. 高速公路复合桥面铺装结构与材料优化设计及施工关键技术研究[R]. 西安: 长安大学, 2010.  
SHEN Ai-qin. Structure and material optimization design and key construction technology for expressway composite pavements[R]. Xi'an: Chang'an University, 2010. (in Chinese)
- [3] 蔡燕霞. 湿热多雨地区复合桥面铺装防水粘结层研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.  
CAI Yan-xia. Study on composite bridge deck waterproof adhesive layer for humid and rainy area[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011. (in Chinese)
- [4] 刘 朴, 凌宏伟, 韩 骥. 沥青路面超空隙水压力的测试[J]. 上海公路, 2002(4): 20-22.  
LIU Pu, LING Hong-wei, HAN Ji. Measurement of pore water pressure in asphalt pavement[J]. Shanghai Highway, 2002(4): 20-22. (in Chinese)
- [5] 姜旺恒, 张肖宁, 李 智. 沥青混凝土的动水压力模拟试验[J]. 公路交通科技, 2011, 10(10): 35-39.  
JIANG Wang-heng, ZHANG Xiao-ning, LI Zhi. Simulation test of dynamic water pressure for asphalt pavement[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 10(10): 35-39. (in Chinese)
- [6] 崔新壮, 金 青. 轮载作用下饱水沥青路面的动力响应[J]. 山东大学学报: 工学版, 2008, 38(5): 19-24.  
CUI Xin-zhuang, JIN Qing. Dynamic response of saturated asphalt pavement under wheel loads[J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2008, 38(5): 19-24. (in Chinese)
- [7] Chen C, Williams R C. Water flow simulation and analysis in HMA microstructure[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(5): 362-370.
- [8] 周长红, 陈静云, 王哲人, 等. 沥青路面动水压力计算及其影响因素分析[J]. 中南大学学报: 自然科学版,

(下转第 25 页)