

径向非均匀对沥青混合料抗剪性能的影响

许银行¹, 谢兆星²

(1. 武汉市政工程研究院有限责任公司, 湖北武汉 430015; 2. 同济大学, 上海市 200092)

摘 要: Superpave 旋转压实成型试件时, 由于旋转作用和试模对混合料的约束, 成型试件很容易产生径向非均匀分布。该文采用 CT 技术研究了混合料的径向非均匀性, 通过恒高度频率扫描试验和恒高度重复剪切试验研究了径向非均匀性对沥青混合料抗剪能力的影响。研究结果表明: 径向非均匀性使混合料的抗剪能力偏高, 容易导致过高地估计混合料性能, 进而使路面设计不安全。

关键词: 沥青混合料; 径向非均匀; CT 技术; 均匀性指数; 抗剪能力

中图分类号: U414 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-7716(2007)02-0085-05

0 引言

沥青混合料室内试验是研究工作的重要组成部分, 设计和路用性能的预测都是建立在室内试验结果之上的。当对沥青混合料进行力学性能试验时, 假定混合料是均匀分布的, 然而, 在混合料拌和和压实过程中, 非均匀分布很容易产生。如果非均匀对混合料力学特性有较大影响, 那么试验结果就可能是错误的, 进而导致对混合料性能作出错误判断。为了防止这一情况的发生, 进行非均匀性对沥青混合料力学性能影响研究十分必要。

集料是沥青混合料主要的组成部分, 它的分布直接影响混合料的路用性能。实验室在制备试件过程中, 集料经常会出现不同形式的非均匀分布, 如竖向非均匀、径向非均匀或窝状非均匀, 而径向非均匀通常是旋转压实试件所特有的形式, 其特征为混合料级配径向分离成细级配和粗级配, 细级配分布在试件中部, 粗级配分布在试件外部。到目前为止, 关于非均匀性对沥青混合料力学性能影响的研究工作很少, 本文通过大量试验研究了非均匀性对沥青混合料抗剪能力的影响。

1 材料和试件的制备

集料采用符合技术要求的辉绿岩, 最大粒径为 19 mm, 沥青采用委内瑞拉产天然沥青, 性能级别为 PG64-28。

为研究集料分布与沥青混合料路用性能的关系, 本研究成型了集料分布均匀性不同的试样, 即径向均匀和径向非均匀试样。试验时, 采用 3 种均匀水平不同的试件, 每种水平成型 8 个试件, 试件

高为 50 mm、直径为 150 mm。第一种均匀水平的试件采用线性碾压成型, 假定线性碾压混合料中集料分布几乎完全均匀, 该水平的试件简称为 LKC; 第二种均匀水平的试件采用旋转压实成型, 在压实过程中集料可能会产生径向非均匀分布, 该水平的试件简称为 SGC; 第三种均匀水平的试件也采用旋转压实成型, 但试件外部由粗级配混合料组成, 中部由细级配混合料组成, 中部和外部集料级配见表 1, 两种级配混合料分别占总体积的 52.8% 和 47.2%, 该水平的试件简称为 ISG。粗、细级配结合料的最佳用量通过理论计算、试验和混合料的工作性确定, 但 3 种均匀水平试件的沥青总用量是相同的。

2 图像获取与图像分析

通过二维图像处理技术可以计算混合料的非均匀性指数, 进而评价混合料集料分布的均匀性。在进行二维图像分析时, 首先沿水平或垂直方向将试件切割, 然后使用数码相机获取剖面图像, 最后对图像进行处理并计算非均匀性指数。

随着科学技术的发展, CT 技术作为图像获取的工具已应用在沥青混合料内部结构研究中, 它可以对沥青混合料内部结构进行无破损检测, 其设备包括 X 射线扫描仪和用于图像分析的计算机见(见图 1)。在对沥青混合料进行 CT 扫描过程中, X 射线穿透不同物质时其亮度会产生不同衰减, 检测器根据亮度不同的 X 射线成像。CT 技术对密度微小变化非常敏感, 在对混合料扫描时, 集料、马蹄脂和空隙很容易区分, 以便进一步分析。在本研究中, 每个试件要进行 180 次 CT 扫描成像(见图 1、图 2)。

3 均匀性指数及其分析结果

在计算混合料均匀性指数时, 假定混合料的

收稿日期: 2006-10-24

作者简介: 许银行(1979-), 男, 安徽萧县人, 硕士, 从事市政道路设计和路面研究工作。

表 1 混合料设计级配、中部细级配和外部粗级配汇总表

混合料类型	筛孔尺寸(mm)									
	19.0	12.5	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
	通过率(%)									
设计级配	100	76	63	43.6	30.4	22.1	16.3	11	7.6	5.2
粗级配	100	69.9	52.1	27.4	20.8	15.9	12.1	8.2	5.7	3.9
细级配	100	86.19	78.03	66.7	43.67	30.54	22.15	14.78	10.25	7.00

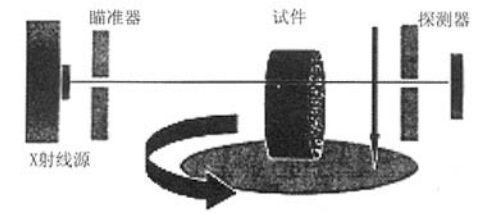


图 1 试件 CT 扫描过程

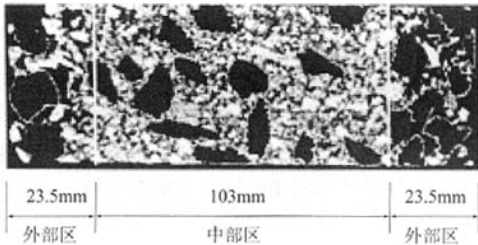


图 2 径向非均匀试件的垂直扫描图像

均匀性服从正态分布，母体统计变量为试件中部和外部粗集料($\geq 4.75\text{ mm}$)的数目和面积。为了避免二维分析中截面相互影响，本研究对每个试件进行 9 个垂直截面分析，每个截面间隔距离为 10 mm 。

当采用计算机程序分析 CT 扫描图像时，计算机应对每个截面进行区域划分并且对中部和外部粗集料进行分离。每个截面分成三个垂直分区见(见图 2)：两个含粗级配的外部区，其宽度为 23.5 mm ；一个含细级配的中部区，其宽度为 103 mm 。混合料均匀性指数 z 按下式计算：

$$z=p_r/p_c$$

式中， p_r 为试件截面外部区粗集料总面积与试件截面外部区总面积之比； p_c 为试件截面中部区粗集料总面积与试件截面中部区总面积之比。

当均匀性指数 z 服从正态分布、置信概率为 95% 时，均匀性指数的置信上限为 1.645。当试件的均匀性指数 z 的计算值小于 1.645 时，试件的集料分布被视为均匀分布；当试件的均匀性指数 z 的计算值大于 1.645 时，试件的集料分布被视为

非均匀分布。试件的均匀性指数 z 计算结果见表 2。表中 L 表示线性碾压成型试样(LKC),H 表示旋转压实成型试样(HSG),I 表示旋转压实成型非均匀试样(IG)。

表 2 径向非均匀性指数 z 计算结果

试件	Z 值	试件	Z 值	试件	Z 值
L1	0.29	H ₁	0.76	I1	2.21
L2	0.02	H ₂	0.49	I2	2.10
L3	0.01	H ₃	0.40	I3	1.78
L4	0.32	H ₄	0.61	I4	1.60
L5	0.12	H ₅	0.78	I5	1.04
L6	0.08	H ₆	0.38	I6	1.58
L7	0.08	H ₇	0.96	I7	1.87
L8	0.19	H ₈	0.35	I8	1.80
平均值	0.14	平均值	0.59	平均值	1.75
标准差	0.12	标准差	0.22	标准差	0.36
变异系数	84.5	变异系数	37.8	变异系数	20.6

由表 2 可知，随着非均匀性水平的增加， z 值也在增加，这说明均匀性指数 z 是合理的。LKC 和试件的均匀性指数 z 都比其临界值低，这说明试件中不存在径向非均匀分布。HSG 试件的均匀性指数 z 也比其临界值低，这说明 HSG 试件在理论上也不存在径向非均匀分布。然而，HSG 试件的均匀性指数 z 值比 LKC 试件的高，这说明 HSG 试件存在轻微的径向非均匀分布。对于 ISG 试件，大多数试件的均匀性指数 z 值比其临界值要高，这说明 ISG 试件中存在径向非均匀分布。通过均匀性指数 z 分析获得的混合料均匀性结果与试件实际情况相符，这表明使用均匀性指数 z 区别混合料的均匀性水平是可行的。

4 空隙率的测定

通过研究试样外部和中部的空隙率可以分析试样中空隙率的径向分布情况，本文采用图像处理技术对试样外部和中部的空隙率进行了分析，分析结果如表 3，表中 L 表示线性碾压成型试样(LKC),H 表示旋转压实成型试样(HSG),I 表示旋转压实成型非均匀试样(IG)。

表 3 试件外部和中部空隙率图像处理技术分析结果

试样	中部空隙率 (%)	外部空隙率 (%)	试样	中部空隙率 (%)	外部空隙率 (%)	试样	中部空隙率 (%)	外部空隙率 (%)
L ₁	8.60	7.79	H ₁	5.42	7.10	I ₁	0.91	7.67
L ₂	4.12	4.81	H ₂	4.13	5.75	I ₂	0.81	8.39
L ₃	4.41	5.05	H ₃	4.59	7.59	I ₃	0.18	8.78
L ₄	3.43	4.17	H ₄	4.39	6.03	I ₄	0.20	8.48
L ₅	4.06	3.58	H ₅	5.17	7.41	I ₅	1.08	8.50
L ₆	6.02	5.41	H ₆	4.50	6.98	I ₆	0.66	7.84
L ₇	9.15	7.54	H ₇	5.03	6.65	I ₇	0.43	8.69
L ₈	8.89	8.89	H ₈	5.70	6.40	I ₈	0.26	8.36
平均值	6.10	5.91	平均值	4.79	6.69	平均值	0.57	8.34
标准差	2.45	1.45	标准差	0.54	0.69	标准差	0.35	0.39
变异系数	40.13	28.38	变异系数	11.28	10.25	变异系数	61.39	4.67

由表 3 可知,LKC 试件外部和中部的空隙率基本相同,HSG 和 ISG 试件外部的空隙率都高于中部,尤其是 ISG 试件,其外部空隙率远远大于中部空隙率,其原因在于 ISG 试件外部级配比中部粗。

5 力学试验与分析

为了研究非均匀对混合料力学性能的影响,本文对均匀和径向非均匀混合料进行加载剪切试验,试验在 Superpave 剪切试验仪(SST)上进行。加载剪切试验包括等高度循环蠕变试验(FSCH)和等高度重复剪切试验(RSCH),等高度循环蠕变试验是描述沥青混合料结构特性(应力-应变关系)的控制应变试验;等高度重复剪切试验通过测量沥青混合料的累计永久变形(ϵ_p)和疲劳寿命(N_f)来评价沥青混合料的力学性能,在该试验中应力保持不变。

在三种不同径向均匀性水平下,通过等高度循环蠕变试验和等高度重复剪切试验分析混合料抗剪性能的差异。在等高度循环蠕变试验中,试验温度分别 25℃和 50℃,混合料的抗剪能力通过剪切应力、应变和相位角 δ 来计算,材料的弹性用剪切模量 G^* 评价,它是剪切应变与剪切应力比值。当采用控制应变加载模式或者沥青混合料厚度较薄($<5\text{ cm}$)时,采用 $G^* \sin \delta$ 测定的混合料的抗剪能力, $G^* \sin \delta$ 反映了薄层沥青路面在中等温度下的疲劳性能。当采用控制应力加载模式或者沥青混合料厚度较厚($>15\text{ cm}$)时,采用 $\sin \delta / G^*$ 测定的混合料的抗剪能力, $\sin \delta / G^*$ 反映了混合料的高温抗车辙能力和中等温度时抗疲劳能力, $\sin \delta / G^*$ 越小,混合料的高温抗车辙能力和中等温度时抗疲劳能力越大。

在等高度重复剪切试验中,试验温度为 50℃,对试件施加重复正弦波剪切荷载,加载频率为 10 Hz,将荷载作用 5000 次时的变形和使试件产生 2%应变时的循环次数作为混合料的抗剪性能指标,等高度循环蠕变试验结果和等高度重复剪切试验结果见表 4。

在比较三种不同均匀性水平下混合料的抗剪性能有无明显差异时,选用 F 检验,根据 F 的临界值和 F 的计算值判断混合料的抗剪性能有无明显差异。F 值检验结果表明:在两种试验温度(25℃和 50℃)下,ISG 试件和 LKC 试件的抗剪性能都有明显差异,ISG 的剪切模量明显高于 LKC 试件,ISG 试件的车辙破坏指标(50℃时, $\sin \delta / G^*$)和应力控制方式下的疲劳破坏指标(25℃时, $\sin \delta / G^*$)都较低,ISG 试件在荷载作用 5 000 次后的永久变形(ϵ_p)较低,SG 试件的疲劳寿命明显高于 LKC 试件。然而,ISG 试件在应变控制方式下的疲劳破坏指标(25℃时, $G^* \sin \delta$)较高。这表明,当混合料中存在径向不均匀分布时,其剪切特性(控制应变方式下的疲劳特性除外)被显著高估。

根据表 4 中等高度循环蠕变试验(25℃时)结果的统计量 F 可知,LKC 和 HSG 试件的剪切模量 G^* 和疲劳破坏指标 $G^* \sin \delta$ (控制应变加载模式)没有明显差异,然而,HSG 试件在控制应力加载模式下的疲劳破坏指标 $\sin \delta / G^*$ 明显偏低。由此可见,当试验温度为 25℃时,旋转压实试件中出现轻微的非均匀分布就会引起沥青混合料疲劳性能偏高,从而导致过高地估计混合料的疲劳性能。根据表 4 中等高度循环蠕变试验(50℃时)结果的统计量 F 可知,HSG 试件的剪切模量明显高于 LKC 试件,而其高温抗车辙性能指标 $\sin \delta / G^*$ 显

表 4 不同试验温度和非均匀水平下剪切特性的平均值和标准差,以及不同温度和不同非均匀

剪切指标	试验	温度(℃)	试件	平均值	标准差	组合	F 计算值	F 临界值	有无明显差异
$G^* \times 10^5$ (kPa)	FSCH	25	L	8.25	0.66	LH	0.72	3.46	无
			H	8.91	0.74	LI	15.84	3.46	有
			I	11.40	1.65	HI	9.81	3.46	有
$G^* \sin \delta \times 10^2$ (kPa)	FSCH	25	L	6.01	0.48	LH	0.08	3.46	无
			H	6.16	0.51	LI	10.06	3.46	有
			I	7.71	1.11	HI	8.31	3.46	有
$\sin \delta / G^* \times 10^{-4}$ (1/kPa)	FSCH	25	L	8.90	0.76	LH	4.20	3.46	有
			H	7.82	0.65	LI	28.79	3.46	有
			I	6.07	0.82	HI	10.99	3.46	有
$G^* \times 10^4$ (kPa)	FSCH	50	L	3.71	0.49	LH	25.75	3.46	有
			H	5.15	0.28	LI	35.25	3.46	有
			I	5.40	0.42	HI	0.75	3.46	无
$\sin \delta / G^* \times 10^{-2}$ (1/kPa)	FSCH	50	L	2.58	0.37	LH	20.31	3.46	有
			H	1.81	0.11	LI	24.22	3.46	有
			I	1.74	0.15	HI	0.17	3.46	无
$\varepsilon_r @ 5000$ (%)	RSCH	50	L	3.69	0.89	LH	0.01	3.63	无
			H	3.72	0.26	LI	24.89	3.63	有
			I	1.75	0.18	HI	28.54	3.63	有
N_f	RSCH	50	L	1,460	1,046	LH	0.18	3.63	无
			H	980	114	LI	23.14	3.63	有
			I	6,583	1,832	HI	30.81	3.63	有

著低于 LKC 试件。由此可见,当试验温度为 50℃ 时,旋转压实试件中出现轻微的非均匀分布就会导致过高地估计混合料的剪切模量和抗车辙性能。然而,在试验温度为 50° C 时,LKC 和 HSG 试件的等高度重复剪切试验结果并没有明显差异,其原因可能是在等高度重复剪切试验中所施加的应力水平较大。

根据表 4 中 HSG 和 ISG 试件性能对比结果可知,在试验温度为 25℃ 时,随着混合料径向非均匀性的增加,混合料的剪切模量增大,厚度较厚的沥青混合料的抗疲劳性能降低,厚度较薄的沥青混合料的抗疲劳性能降低。然而,在试验温度为 50℃ 时,ISG 试件的剪切模量 G^* 和高温抗车辙性能指标 $\sin \delta / G^*$ 与 HSG 试件相比,没有明显差异。在高温(50℃)条件下的等高度重复剪切试验结果表明,ISG 试件的抗剪能力明显高于 HSG 试件。由此可见,在相同试验温度条件下,等高度循环蠕变试验与等高度重复剪切试验所测的材料性能结果存在差异,该差异可能是因两种试验的应力水平不同引起的。根据 HSG 试件和 ISG 试件性能试验结果可知,在中等温度条件下,混合料的非均匀性容易导致过高估计混合料的剪切模量和厚度较厚的沥青混合料的抗疲劳性能;在高温条件下,混合料的非均匀性容易导致过高估计混合料

的高温抗车辙性能。

造成非均匀性混合料性能偏高的原因可能有两个:

(1)材料的性能主要取决于试件的中部。在 Superpave 剪切试验中,由于试件外侧无约束,试件顶面的剪应力存在不均匀分布。研究表明,均匀剪应力仅仅分布在试件中部三分之一的面积上。因此,材料的性能主要决定于试件中部(中部承受了大部分应力)的性能。由于试件中部孔隙率低、密度大、具有较高抗剪的能力,所以均匀性差的混合料抗剪性能好。

(2)材料的抗剪能力取决于试件的外部。对于非均匀性试件,其外部级配粗、粗集料含量多、集料的嵌挤效果优于均匀混合料,外部集料的嵌挤结构增大了试件外部的约束,从而提高了非均匀试件的高温抗车辙能力。

不管混合料性能取决于试件中部还是外部,认识到非均匀性对混合料性能的影响是非常重要的,因为混合料中存在轻微的非均匀分布就可能导致过高地估计混合料性能,进而使路面设计不安全。

6 结论

(1)对于三组试件,由垂直剖面计算的非均

匀指数明显不同 见(见表 2), ISG 试件的非均匀指数大于其置信上限, 试件为径向非均匀分布; 由于旋转作用, HSG 试件的非均匀指数比 LKC 试件的要高, 但仍小于非均匀指数的置信上限。

(2) 对于三种均匀性水平不同的试件, 25℃时通过等高度重复剪切试验和等高度循环蠕变试验测定的混合料抗剪能力存在明显差异。但总的来讲, 随着混合料径向非均匀性的增加, 混合料的剪切模量在增大, 厚度较薄的沥青混合料的高温抗车辙性能和抗疲劳性能在提高。

(3) 50℃时等高度循环蠕变试验结果表明, 均匀和非均匀 SGC 试件抗剪能力没有明显差异。

(4) 试验温度影响材料抗剪能力与径向非均匀水平的关系, 25℃时, 等高度循环蠕变试验结果

与非均匀指数呈线性关系; 50℃时, 两者呈非线性关系。在不同温度下两者相关性不同的原因在于结合料的劲度随温度变化而变化。

(5) 50℃时通过等高度重复剪切试验测得的混合料抗剪能力与混合料的非均匀指数呈线性关系。50℃时等高度重复剪切试验和等高度循环蠕变试验测定的混合料抗剪能力不同, 其原因在于前者的应力水平较高。

(6) 非均匀性混合料性能偏高的原因可能在于试件中部的细级配或外部的粗级配。不管原因在于试件中部还是外部, 认识到非均匀性对混合料性能的影响是非常重要的, 因为混合料中存在轻微的非均匀分布就可能导致过高地估计混合料性能, 进而使路面设计不安全。

青岛海湾大桥正式开工

青岛海湾大桥第一桩桩基近期开钻, 这意味着备受关注的青岛海湾大桥项目主线工程在黄岛正式开工。

青岛海湾大桥是国家高速公路网青岛至兰州高速公路的起点段, 是山东省“五纵四横一环”公路网主框架的重要组成部分, 也是青岛市规划的胶州湾东西岸跨海通道“一路、一桥、一隧”中的“一桥”。该桥起于青岛胶州湾高速公路李村河大桥北200 m处, 终于黄岛胶州湾高速东1 km处, 顺接在建的青岛至莱芜高速公路, 主线全长26.707 km。主线采用双向6车道标准, 桥梁宽35 m, 设计时速80 km/h, 大桥一期工程概算总投资90亿元人民币, 建设期3.5年, 预计2010年大桥正式建成通车。

根据设计方案, 青岛海湾大桥三个主航道桥(沧口、红岛和大沽河航道桥)分别采用钢箱梁双塔斜拉桥、钢箱梁独塔斜拉桥和独塔自锚式悬索桥, 其结构简捷, 经济合理, 美观协调, 气势磅礴, 国内外尚无同类型结构, 是世界上屈指可数的桥梁集群。工程技术难度大, 条件复杂, 受水文、地形、通航、航空和地质结构条件的制约, 创新点很多, 有45个高精尖专题研究课题有待攻关。