

级配对矿质颗粒体离析的影响研究及应用*

包秀宁^{1,2}, 张肖宁¹, 吴旷怀², 李燕枫²

(1. 华南理工大学交通学院, 广东 广州 510640;

2. 广州大学土木工程学院, 广东 广州 510006)

摘要: 为取得不易离析的路面颗粒材料, 开展了级配对矿质颗粒体离析的影响研究。首先通过实验研究, 确定反映路面颗粒材料离析的试验方法; 然后应用级配设计理论, 设计不同级配参数的矿质颗粒体, 根据各颗粒体离析试验结果, 采用级配设计参数与表征颗粒体粒径分布的平均粒径与粒径分散系数, 分析颗粒体级配与其离析程度的关系。研究发现, 最大粒径相同的颗粒体, 平均粒径和粒径分散系数存在离析程度最小的临界值, 超出此临界值的颗粒体离析程度变大; 临界值对应的级配为次级粒径颗粒填充上级粒径颗粒空隙时, 留下适当空间的级配; 且平均粒径和粒径分散系数存在良好对应关系, 粒径分散系数随平均粒径的增大而减小。另外, 对比分析了矿质颗粒体离析试验与沥青混合料施工离析的对应关系。

关键词: 道路工程; 颗粒体; 连续分布模型; 离析; 粒径分散系数; 级配

中图分类号: U416.217 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2009) 06-0048-06

Research and Application of the Gradation Impact on Mineral Granular Masses Segregation

BAO Xiuning^{1,2}, ZHANG Xiaoning¹, WU Kuanghuai², LI Yanfeng²

(1. College of Traffic And Communication, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. School of civil engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510405, China)

Abstract: The gradation impact on mineral granular masses segregation was studied for less segregation materials in pavement. The segregation test was built for pavement material detection, and mineral granular materials of different gradation index was designed by gradation theory. According to segregation test, the relation between gradation and segregation of granular masses was analyzed with gradation index, average diameter and diameter distribution index as the representation parameters of gradation. For granular masses with the same maximum diameter particle, the study shows that average diameter and diameter distribution index both having critical value, the critical value gradation has the minimize segregation and other gradations have more serious segregation. Critical value gradation is the gradation that remains reasonable voids when the next smaller particles fill the voids left by the bigger particles. It also found that average diameter and diameter distribution index have a good correspondence and the latter reduces with the former increasing. Finally, the results of mineral granular material segregation test and asphalt mixture segregation in pavement was analyzed.

Key words: highway engineering; granular masses; continuous distribution model; segregation; diameter distribution index; gradation

* 收稿日期: 2009-01-03

基金项目: 国家西部交通建设科技资助项目 (200431800004)

作者简介: 包秀宁 (1973 年生), 女, 副教授, 通讯作者: 张肖宁, E-mail: gd_bxn@163.com

在沥青路面的垫层、基层和面层中广泛使用各种颗粒材料,如石屑、砂砾、碎石和沥青混合料等。这些颗粒材料在施工中流动或振动后,会出现不同粒径颗粒的分离现象,称其为离析或偏析^[1-2]。颗粒离析后,改变了原设计颗粒体的分布结构,易造成材料路用性能降低和结构破坏。颗粒体的离析与其运动方式及其级配、颗粒尺寸、形状等有关^[3-5]。由于受路面施工工艺和程序的限制,颗粒体的运动方式基本是固定的,控制颗粒材料自身的离析性能,才能更好的减少颗粒体离析。因此,研究颗粒体的级配对其离析程度的影响具有重要意义。路面颗粒材料常由多种粒径的颗粒组成,多元颗粒体的离析理论研究还比较缺乏^[6-9],本文通过离析试验研究,分析多元颗粒体的级配与离析的关系。

1 离析试验方法

在沥青混合料的运输、摊铺离析过程中,颗粒发生流动并且承受相互之间的摩擦作用^[5],据此先后设计了两种离析试验方法,分别是堆积离析试验和圆筒法离析试验。堆积离析试验是颗粒材料在一定高度的漏斗容器内自由流出,自然堆积在底板上,形成堆积体。圆筒法离析试验是将颗粒材料装入固定竖立在平面的设计圆筒,然后缓缓提起圆筒,让颗粒材料自然堆积在底板上,形成堆积体。对自然堆积的锥体,以堆积体中心位置和外围位置的试样,代表施工中发生离析的中心和外侧位置的路面颗粒材料。中心试样和外围试样按堆积体底面径向选取,以堆积体底面中心为圆心,底面二分之一半径的圆周线为边界,此边界范围内的材料作为中心试样,此边界外的材料作为外围试样。通过筛分获得中心试样和外围试样的级配。试验重复进行2次,取平均值。

通过对比试验发现,堆积法和圆筒法两种离析试验对颗粒体离析的反映趋势是一致的,但圆筒法的试验稳定性更好,因此研究级配对颗粒体离析的影响采用圆筒法离析试验。根据颗粒体流动理论和路用颗粒料的直径尺寸^[10],设计试验圆筒直径为15 cm,高为45 cm,以保证颗粒材料由圆筒内自然流出。

2 试验级配设计

2.1 级配设计

试验级配应包括路面材料的级配范围,才能全面反映级配与离析的关系。在级配设计时,分析了

富勒级配理论和魏矛斯干涉级配理论,以两种理论设计连续级配,选取适当的参数可以得到近似的级配。为直观表现颗粒的填充情况,采用魏矛斯干涉级配理论,通过控制次级粒径颗粒的实积率,设计了公称最大粒径19 mm的5种级配颗粒体和公称最大粒径13.2 mm的3种级配,以此对比不同最大粒径的影响。公称最大粒径19 mm的5种级配,一种级配取标准实际实积率,编号为W1,其他4种级配的实积率分别在标准实际实积率的基础上进行增减,W2的实积率减0.05,W3的实积率减0.08,W4的实积率加0.05,W5的实积率加0.10。这5个级配包括了面层材料设计规范给出的级配范围。作为不同最大粒径颗粒体的比较,公称最大粒径13.2 mm的颗粒体设计了3种级配,也是一种级配取标准实际实积率,编号为W6,另外2种级配一个是W7,实积率比W6减少0.05,另一个是W9,实积率比W6增加0.05。各种级配数据如表1所示。

由表1可知,采用魏矛斯干涉级配理论,通过次级粒径颗粒实积率的变化设计的级配,实积率增加的级配,粗颗粒增加而细颗粒减少;实积率减少的级配则反之,细颗粒增加而粗颗粒减少。因此,各设计级配不仅表现了颗粒填充程度的差异,也直接体现了粗、细颗粒比例的变化。

2.2 级配表征参数

分析颗粒体的级配与离析的关系,需要表征颗粒体级配组成的参数。实积率虽然可以表明颗粒逐级填充程度,但是表征颗粒体的组成应明确反应颗粒体中颗粒尺寸与各组成颗粒的比例。颗粒体的组成状态可以用总体粒度的大小和各粒径颗粒的分布来描述,这两方面分别用颗粒体的平均粒径和粒径分散系数两个参数表示^[11]。路用颗粒材料的粒径分布在一定尺度范围内,可以假设各颗粒的粒径是连续的,因而可以建立颗粒体的粒径连续分布模型。

已知颗粒体各粒径颗粒的百分含量,可以通过累加某粒径以下颗粒的含量得到该粒径颗粒的分布率,根据所有颗粒的粒径与其分布率的数据,即可建立粒径连续分布模型。经试算确定颗粒体的粒径分布函数 $F(x)$ 为4次多项式,可表示为 $F(x) = b_1x^4 + b_2x^3 + b_3x^2 + b_4x + b_5$ 。对分布函数求导,可得到颗粒体的粒径概率密度函数 $f(x)$ 。根据颗粒体的粒径分布函数,可以求出任意区间内颗粒体的粒径分布情况。对于某一粒径范围的颗粒体,在此范围内任一粒径区间 $[a, b]$ 的分布概率 P_i ,可由下式求得:

表 1 试验级配
Table 1 Test gradations

粒径/mm	级配 (通过率/%)							
	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W9
26.5	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
19	86.2	90.5	94.0	82.1	77.9	100.0	100.0	100.0
16	76.2	84.8	92.9	69.0	62.1	100.0	100.0	100.0
13.2	66.7	78.9	91.1	57.4	49.0	87.6	93.0	83.2
9.5	56.5	70.6	85.5	46.2	37.5	74.1	83.3	66.9
4.75	42.6	55.2	68.2	33.4	25.9	55.9	65.2	48.5
2.36	30.9	41.4	52.0	23.3	17.2	40.5	48.8	33.7
1.18	21.0	29.2	37.3	15.3	10.8	27.6	34.4	22.1
0.6	12.9	18.5	24.1	9.0	6.2	16.9	21.8	13.1
0.3	5.9	8.7	11.6	4.0	2.6	7.7	10.3	5.8
0.15	0	0	0	0	0	0	0	0

$$P_i = F(b) - F(a) = \int_a^b f(x) dx \quad (1)$$

设在任意粒径区间段 $[a, b]$ 的平均粒径为 x_i , 则 x_i 可由下式求得:

$$x_i = \frac{1}{P_i} \int_a^b f(x) x dx \quad (2)$$

该颗粒体的粒径分散系数 K_d 可用下式计算:

$$K_d = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2 P_i}{\sum P_i}} / \bar{x} \quad (3)$$

上式中 \bar{x} 表示颗粒体中所有颗粒的平均粒径。粒径分散系数越小, 颗粒的粒径分布越均匀。根据平均粒径和粒径分散系数的计算公式可知, 这两个参数由所有颗粒的粒径和组成比例确定, 适合表征颗粒体的组成状态。

按以上方法计算各设计级配颗粒体的平均粒径和粒径分散系数, 结果如表 2 所示。

表 2 矿质颗粒体的平均粒径和粒径分散系数

Table 2 \bar{x} and K_d of mineral granular masses

级配参数	级配							
	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W9
平均粒径/mm	8.59	6.30	4.08	10.36	11.92	5.43	4.23	6.40
粒径分散系数	0.826	1.045	1.292	0.709	0.614	0.889	1.023	0.800

根据表 2 的计算结果发现, 按颗粒逐级填充理论设计的颗粒体, 同一最大公称粒径的各级配颗粒体的平均粒径与粒径分散系数, 随实积率的增减呈现良好的对应关系, 粒径分散系数随平均粒径的增大而减小; 在相等平均粒径条件下, 颗粒体的粒径分散系数随最大公称粒径的减小而减小, 其对应关系如图 1 所示。

对于公称最大粒径 19 mm 的系列颗粒体, 具有标准实积率的 W1 颗粒体的平均粒径和粒径分散系数处于中间, 实积率减小, 颗粒体的平均粒径减小, 粒径分散系数增大; 实积率增大, 则颗粒体的平均粒径增大, 粒径分散系数减小。公称最大粒径

13.2 mm 的系列颗粒体具有同样规律。

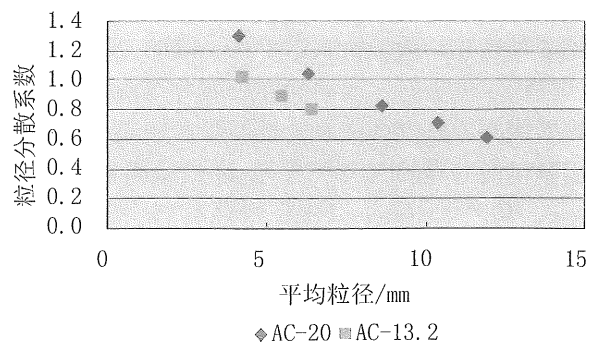


图 1 平均粒径与粒径分散系数的关系

Fig. 1 Relation of \bar{x} and K_d

3 离析试验结果及分析

3.1 离析指标建立

分析颗粒体的级配与离析之间的关系,需要确定一个表示颗粒体总体离析程度的统计量。颗粒体各粒径颗粒的含量是不同的,直接以各粒径颗粒的含量增减量表示离析程度,不能体现其含量权重的影响。为此引入离析率的概念,离析率即是颗粒含量的改变量与其原含量的比值。综合考虑各粒径颗粒的离析程度,将所有颗粒的离析率取绝对值累加起来,再取平均值,称为平均离析率,以此表示颗粒体总体离析程度。由于离析试验外围试样与中心试样的各颗粒含量的增减存在相对关系,在取平均离析率时,以外围试样计算平均离析率,不再重复计算中心试样的离析率。

3.2 试验结果分析

试验材料采用路用石灰岩,按照上面设计的级配进行圆筒法离析试验。根据离析试验结果,计算各级配颗粒体的平均离析率,结果如表3所示。

表3 矿质颗粒体的平均离析率

Table 3 Average segregation ratios of mineral granular masses

离析指标	级配								
	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W9	
平均离析率 /%	21.3	20.6	22.4	22.8	26.5	25.4	22.4	25.9	

首先,分析级配设计参数——实积率与离析的关系。先看最大公称粒径19 mm的W1~W5颗粒体的离析情况,W1颗粒体的级配是按实际实积率设计的,其平均离析率较小,但并不是最小。离析程度最小的是W2颗粒体,W2的级配比W1级配的实积率减小了0.05。也就是说,在次级粒径颗粒填充上级粒径颗粒的空隙时,略留下空隙空间,可以得到更不易离析的颗粒体。但是留下的空隙空间应在一定限度内,留下空间过大,如W3颗粒体,离析程度又大于按实际实积率设计颗粒体的离析程度了。而实积率增加的级配颗粒体W4、W5,随着实积率增加程度的增大,其相应颗粒体的离析程度也越严重。

由表3可知,最大公称粒径13.2 mm的颗粒体的实积率与离析的关系,与最大公称粒径19 mm的颗粒体的情况完全一致。

其次,比较级配参数与离析的关系。对比表2

和表3,对于按照不同实积率设计的级配,当最大公称粒径相同时,处于某一临界平均粒径的颗粒体,其平均离析率最小,平均粒径大于或小于临界值的颗粒体,离析程度都增大,距离临界值越远离析程度越大;与此相似,粒径分散系数也存在这样的临界值。平均粒径和粒径分散系数临界值对应的级配,即是上述实积率比标准实际实积率略小的级配。

如果从粗细颗粒材料的组成角度分析,对于最大公称粒径19 mm的颗粒体,4.75 mm通过率在60%以上或在35%以下,颗粒体的离析程度逐渐增大;对于最大公称粒径13.2 mm的颗粒体,4.75 mm通过率在70%以上或在50%以下,颗粒体的离析程度逐渐增大。由于材料性能的差异,不同集料控制范围可能存在一定差异,上述控制范围仅适用本试验所使用的材料。根据试验结果,如果要避免颗粒材料的过分离析,应根据颗粒体的最大公称粒径不同,通过离析试验合理的确定粗、细颗粒的比例。

不同级配颗粒体的级配与离析关系的试验研究,建立了颗粒材料的级配参数与其离析程度的关系,并结合级配设计参数,提出设计具有不易离析级配的颗粒体的双向控制条件,这对路面材料级配设计具有重要意义。

4 工程应用分析

沥青混合料在产生离析的运输、摊铺的过程中温度很高,呈现离散的颗粒物质形态,所以在分析其离析问题时,可以把它作为颗粒材料。但是它与前面的矿质颗粒体有所不同,含有粘性物质,属于具有粘性的颗粒材料。非粘性颗粒体抵抗剪切是靠内摩擦力,粘性颗粒体抵抗剪切增加了粘聚力,如果把内摩擦力和粘聚力的合力作为广义的内摩擦力,矿质颗粒体的离析分析应该也适用于热沥青混合料。

为了验证矿质颗粒体离析试验是否可表现沥青混合料的离析,在K高速公路沥青路面现场,抽取其上、中、下面层的沥青混合料作为离析试样,每种沥青混合料随机抽取5份试样。上、中、下面层分别是AK-16A、AC-20I和AC-25I沥青混合料,以各沥青混合料的生产级配为未离析的初始级配,分别编号为S、Z、X,其各自的抽样则分别编号为S1至S5,Z1至Z5及X1至X5。在实验室完成所有试样的抽提试验后,得到各试样的级配,各面层沥青混合料的生产级配与其抽样级配如图2至4所示。

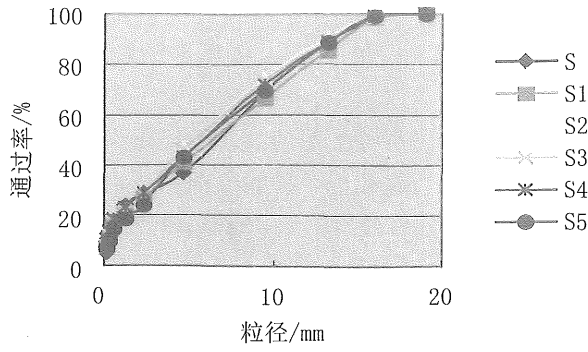


图 2 上面层沥青混合料的级配

Fig. 2 Asphalt mixture gradations in surface layer

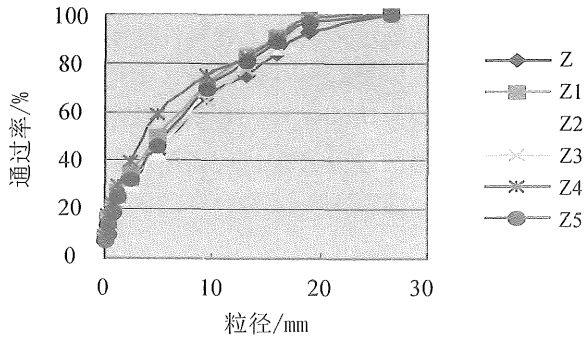


图 3 中面层沥青混合料的级配

Fig. 3 Asphalt mixture gradations in middle layer

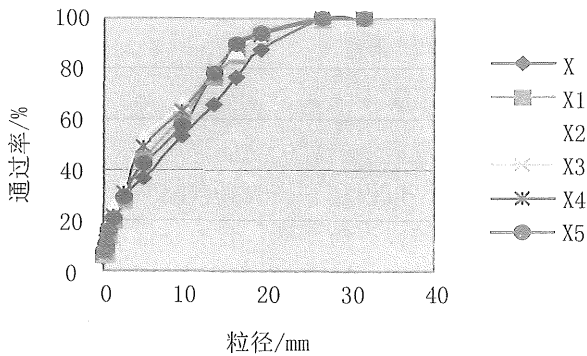


图 4 下面层沥青混合料的级配

Fig. 4 Asphalt mixture gradations in base layer

另外,在实验室内,采用石灰岩进行了上、中、下面层级配的矿质颗粒材料的离析试验。根据设计级配、抽样和离析试验试样的级配数据,可以计算出沥青混合料的平均粒径、粒径分散系数和平均离析率,结果如表 4 所示,表 4 也列出 3 个面层矿质颗粒材料的离析试验结果。

根据表 4 结果,可以看出沥青混合料的平均粒径与粒径分散系数也影响其平均离析率的大小,不过,两者对离析率的影响,并非简单绝对按其大小而决定平均离析率的大小,如中面层级配的平均粒

径和粒径分散系数都大于上面层级配,但是其平均离析率却较小。由第 3 节可知,平均粒径与粒径分散系数对离析的影响还与沥青混合料的最大粒径有关。

表 4 沥青混合料的级配参数与平均离析率

Table 4 The gradation parameters and average segregation ratios of asphalt mixtures

沥青混合料	平均粒径/mm	粒径分散系数	抽样平均离析率/%	试验平均离析率/%
S	6.45	0.769	34.8	28.3
Z	7.46	0.922	23.7	27.2
X	8.85	0.863	42.7	29.2

从现场抽样与离析试验的结果对比中,可以看出,矿质颗粒体的离析试验基本与抽样结果一致,还是能够反映沥青混合料的离析情况,但是对其离析程度的差异性反应较小。这一方面与材料的差异有关,另一方面与离析试验方法和施工离析过程的差异性有关。实际施工中,形成离析的程度与施工水平和工艺有很大的关系。离析试验结果反应的是一定施工水平和工艺下的颗粒材料的离析程度,各面层的施工水平很难做到一致,这也会形成试验结果与施工离析的差异。

5 结 论

通过设计离析试验,确定级配表征参数,研究了级配对矿质颗粒体离析的影响,根据以上工作可以得出如下结论:

(1) 通过增减实积率设计的同一最大公称粒径的级配颗粒体,其平均粒径与粒径分散系数具有良好的对应关系,粒径分散系数随平均粒径的增大而减小;在相等平均粒径条件下,颗粒体的粒径分散系数随最大公称粒径的减小而减小。

(2) 在级配设计时适当减小实积率,即在次级粒径颗粒填充空隙时,留下适当空间,可以得到更不易离析的颗粒体。但空余过多空隙会加重离析;而增加实积率的级配,颗粒体的离析程度会增大。

(3) 当最大公称粒径相同时,颗粒体在某一临界平均粒径处的平均离析率最小,平均粒径大于或小于此极值时,离析程度都加大;与此相同,颗粒体在某一临界粒径分散系数处的平均离析率最小,粒径分散系数大于或小于此极值时,离析程度都加大。两临界值对应的级配为实积率比实际实积

率略小的级配。

(4) 根据离析试验结果,可以确定避免过分离析的粗细颗粒控制比例,控制比例与颗粒体的最大公称粒径有关,一般不同最大公称粒径的颗粒体的控制比例不同。

此外,应用矿质颗粒体的离析试验,对比分析了路面沥青混合料的离析情况,两者的离析结果基本一致。离析试验反映颗粒材料的离析是材料在同等作用水平下的离析,实际施工中,形成离析的程度与施工水平有很大的关系^[12],不同施工段很难控制一致的施工水平,因此离析试验结果能更好表现级配对离析的影响。另外,不同级配颗粒体的离析性差异,证实了级配组成对颗粒体离析具有重要影响,在颗粒材料级配设计时,应检验级配的离析性,以保证路面施工质量。

参考文献:

- [1] 陆坤权,刘寄星. 颗粒物质(上) [J]. 物理, 2004, 33(9): 629-634.
LU Kunquan, LIU Jixing. Static and dynamic properties of granular matter (I) [J]. Physics, 2004, 33(9): 629-634.
- [2] 陆坤权,刘寄星. 颗粒物质(下) [J]. 物理, 2004, 33(10): 713-720.
LU Kunquan, LIU Jixing. Static and dynamic properties of granular matter (II) [J]. Physics, 2004, 33(10): 713-720.
- [3] JAEGER H M, NAGEL S R, BEHRINGER R P. The Physics of granular materials [J]. Physics Today, 1996, 49(2): 32-38.
- [4] WILLIAMS J C. The segregation of particulate materials [J]. Powder Technology, 1976, 15: 245-251.
- [5] 王光谦,倪晋仁. 颗粒流研究评述 [J]. 力学与实践, 1992, 14(1): 7-18.
- WANG Guangqian, NI Jinren. Review on the research of granular flow [J]. Mechanics and Engineering, 1992, 14(1): 7-18.
- [6] 孙其诚,王光谦. 颗粒流动力学及其离散模型评述 [J]. 力学进展, 2008(1): 87-100.
SUN Qicheng, WANG Guangqian. Review on granular flow dynamics and its discrete element method [J]. Advances in Mechanics, 2008(1): 87-100.
- [7] 吴清松,胡茂彬. 颗粒流的动力学模型和实验研究进展 [J]. 力学进展, 2002, 32(2): 250-255.
WU Qingsong, HU Maobin. Advance on dynamic modeling and experimental studies for granular flow [J]. Advances in Mechanics, 2002, 32(2): 250-255.
- [8] 厚美瑛. 空间环境颗粒物质运动行为的研究 [J]. 物理, 2008(10): 729-732.
HOU Meiyang. Granular behavior in microgravity [J]. Physics, 2008(10): 729-732.
- [9] 孙其诚,王光谦,胡凯衡. 颗粒物质力学几个关键问题的思考 [J]. 物理, 2008(10): 1104-1110.
SUN Qicheng, WANG Guangqian, HU Kaiheng. Study on key mechanic problems of granular material [J]. Physics, 2008(10): 1104-1110.
- [10] 吴爱祥. 散体动力学理论及其应用 [M]. 北京:冶金工业出版社, 2002.
- [11] 李昌宁. 非均匀矿岩散体流动规律及其应用研究 [D]. 东北大学, 2000.
LI Changning. Study on heterogeneous loose body flow rules and its application [D]. Northeastern University, 2000.
- [12] 包秀宁,张肖宁. 论沥青路面不均匀性研究 [J]. 公路, 2004(9): 148-151.
BAO Xiuning, ZHANG Xiaoning. The study on nonuniformity of asphalt pavement [J]. Highway, 2004(9): 148-151.