

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2012.10.005

# 基于体积法的水泥稳定级配碎石 配合比设计方法

冯德成, 于飞, 巩春伟

(哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

**摘要:** 为了有效控制水泥稳定级配碎石的结构组成和内部材料分布, 并使其具备更好的路用性能, 利用体积法对间断级配水泥稳定碎石进行配合比设计, 并提出控制指标。以粗骨料的空隙率为评价指标判断混合料是否为骨架嵌挤结构; 以混合料的空隙率为评价指标控制混合料的密实度, 确保所设计的混合料为骨架密实结构。通过试验, 将利用此方法设计的混合料与利用传统级配设计方法设计的混合料在力学性能和干缩性能方面进行了对比, 结果表明利用此方法设计的混合料具备更高的抗压强度和更好的干缩性能。此外, 由于该方法通过具体试验确定混合料级配, 因此能够兼顾不同石料的堆积特性、集料形状、表面纹理等物理性质, 更加有针对性、灵活性。

**关键词:** 道路工程; 水泥稳定碎石; 配合比设计; 体积设计法; 间断级配; 密实骨架; 强度; 干缩

中图分类号: U 416.214

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2012) 10-0022-06

## Mix Design Method of Cement Stabilized Grade Crushed Stone Based on Volume Method

FENG Decheng, YU Fei, GONG Chunwei

(School of Transportation Science & Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang 150090, China)

**Abstract:** In order to control the structure composition and inner material distribution of cement stabilized grade crushed stone and provide its better pavement performance, the mix proportion of gap gradation cement stabilized crushed stone was designed by using the volume design method, and the control index was put forward. To ensure the framework dense structure of the designed mixture, the voids of coarse aggregate was taken as the evaluation index of embedded skeleton structure, the voids of mixture was taken as the evaluation index of density of mixture. The parameters of mixtures designed by the presented method and the traditional method such as mechanical property and drying shrinkage were tested. The results show that (1) the mixture designed by the presented method has better compressive strength and dry shrinkage; (2) as the gradation of the mixture was determined by test, the presented method is more appropriate and flexible and it could consider the accumulation characteristics, aggregate shape and surface texture of different materials.

**Key words:** road engineering; cement stabilized crushed stone; mix design; volume design method; gap gradation; dense framework; strength; dry shrinkage

### 0 引言

水泥稳定碎石的级配形式, 国内外进行了大量的研究。在各种级配形式中, 间断级配结构有足够

数量的粗骨料可以形成空间骨架, 使其相互嵌挤支撑很大强度, 并且因碎石粒径大且多, 相互嵌挤的内摩擦阻力也很大。其间断级配又能保证下一级骨料能够完全填充于上一级骨料所形成的空隙中, 并

收稿日期: 2012-03-23

作者简介: 冯德成 (1968-), 男, 河南信阳人, 教授, 博士生导师. (fdcgxy@vip.sina.com)

且不破坏上一级骨料之间的嵌挤作用, 可使结构有较高的密实度而形成骨架密实结构<sup>[1]</sup>, 从而使道路具有良好的性能来承受行车荷载。

沥青玛蹄脂碎石混合物 (SMA) 的结构中, 粗集料相互嵌挤形成骨架结构, 保证了良好的内摩阻力; 沥青玛蹄脂填充粗集料骨架形成的空隙, 并将集料充分粘结提供粘结力<sup>[2-4]</sup>。而在水泥稳定级配碎石中, 同样有粗集料嵌挤形成强度, 水泥胶砂充当沥青玛蹄脂的作用填充空隙并胶结形成强度。本文利用体积法设计沥青混合料的思路, 对水泥稳定级配碎石进行级配设计<sup>[5-6]</sup>, 并与传统确定级配的方法相比, 此方法可兼顾石料的堆积特性、形状、棱角性、表面纹理等物理特性<sup>[7-9]</sup>。

## 1 基本原理

在间断级配骨架密实结构中, 大粒径的石料相互嵌挤形成骨架, 次一级的石料填充上一级颗粒之间的空隙, 照此方式由大到小依次填充构成骨架的石料, 最后计算出骨架结构的空隙体积, 并将其用水泥胶砂填充, 这样的结构既能形成骨架嵌挤又能达到密实<sup>[10-12]</sup>, 其结构与连续级配骨架密实型结构对比于图 1, 而且这种方法是在针对特定石料进行填充下得到的级配, 考虑到了不同石料的形状特性, 比较有针对性。

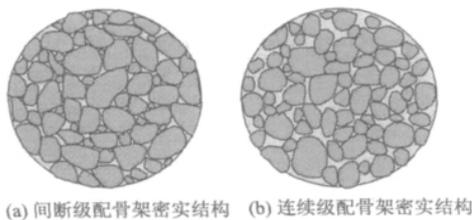


图 1 结构对比

Fig. 1 Comparison of structures

以上思路虽然简单, 但是实际操作却存在困难, 最大的问题是不能判断混合料的填充状态, 也就是没有办法判断次一级的石料是否已经将上一级石料之间的空隙填满, 而且还要保证没有将上一级的石料相互挤开。为此, 在填充时控制各种石料的填充比例, 将粒径为  $d_1$ 、 $d_2$  的石料以不同比例混合, 在各种比例中选出骨架嵌挤结构, 再在这些骨架嵌挤结构的各组中找出空隙率最小也即最密实的一组, 其对应的集料比例作为粒径间形成嵌挤密实结构时的组成比例。重复以上步骤, 依次逐级填充, 得到全部构成骨架的石料比例, 并计算出其空隙体积,

使细集料和水泥胶砂的体积与其相等, 由此便得出了混合料的级配组成。

## 2 控制指标

为了保证混合料是骨架密实型的, 需要保证:

(1) 混合料是骨架嵌挤结构; (2) 结构是密实的。

### 2.1 骨架嵌挤结构控制指标

对于混合料是否为骨架嵌挤结构的判断, 可以借鉴 SMA 评价骨架嵌挤结构的办法, 结合水泥稳定集料的特点来进行评价<sup>[13-14]</sup>。

在自然堆积状态下, 单一粒径的粗石料在自重作用下会相互嵌挤形成骨架嵌挤结构, 此时的空隙率  $VCA$  应大于或等于多种粒径石料混合时压实状态下此粒径粗石料的骨架空隙率  $VCA_{mix}$ <sup>[15]</sup>。即当  $VCA \geq VCA_{mix}$  时, 此粒径的石料是相互嵌挤的, 反之此粒径的石料嵌挤作用就不能形成, 因此可以把空隙率作为骨架结构的控制标准<sup>[16]</sup>。

某一粒径粗集料在自然堆积状态下的空隙率  $VCA$ :

$$VCA = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_b}\right) \times 100,$$

式中,  $\rho$  为该粗集料的自然堆积密度;  $\rho_b$  为该粗集料的表观密度。

混合料在压实状态下某粒径粗集料的骨架空隙率  $VCA_{mix}$ :

$$VCA_{mix} = \left(1 - \frac{V_b}{V}\right) \times 100,$$

式中,  $V_b$  为混合料中该粒径粗集料的体积;  $V$  为混合料的总体积。

### 2.2 混合料密实的控制指标

混合料的空隙率可以作为评价混合料密实程度的指标, 空隙率越小, 说明混合料结构越密实。按照上述方法, 选出骨架嵌挤结构的每种组合, 计算出这些比例下混合料的空隙率, 其中空隙率最小的一组即为骨架嵌挤结构混合料中最为密实的。混合料的空隙率为:

$$VV = \left(1 - \frac{V_s}{V}\right) \times 100,$$

式中,  $V_s$  为混合料中构成骨架结构的集料总体积;  $V$  为混合料的总体积。

因此, 通过粗骨架的空隙率可以评定混合料是否达到骨架嵌挤结构, 在保证为嵌挤结构的前提下, 通过空隙率可以评定混合料的密实状态。由这 2 个指标, 便可判断混合料所组成的结构是否为骨架密

实结构。

### 3 骨架密实型结构级配设计

本次采用粒径为1~3 cm、1~2 cm碎石以及中砂作为研究材料,也就是用1~2 cm碎石将1~3 cm碎石形成的空隙填充,剩余空隙用砂填充,以此形成骨架密实结构。当然只使用1~3 cm的石料和中砂也可以组成骨架密实结构,这种结构只需用中砂将1~3 cm集料形成的空隙填充即可,因此可以将2种方法构成的混合料进行比较。另外,将1~3 cm、1~2 cm碎石以及中砂作为材料,按照传统确定混合料级配的方法,根据级配曲线的范围确定级配,作为对照组与前面2种类型的混合料进行对比。

本次试验对3种不同级配的混合料进行性能对比,分别为:(1)1~3 cm、1~2 cm碎石、中砂;(2)1~3 cm碎石、中砂;(3)1~3 cm碎石、1~2 cm碎石、中砂。其中前2组按本文介绍的方法进行级配设计,第3组按惯用的调级配曲线法进行设计。

仅对第1种组合方式的级配设计进行详细介绍,第2组和第3组仅给出级配结果,具体过程不再赘述。

#### 3.1 骨架嵌挤结构的控制

将1~3 cm碎石与1~2 cm碎石按质量比为4.5:1、4:1、3.5:1、3:1、2.5:1、2:1、1.5:1、1:1的组合对容积为3 L的容量筒进行填充。不同比例填满容量筒时所用2种碎石的质量见表1,其中 $m_1$ 、 $m_2$ 分别为粒径是1~3 cm、1~2 cm碎石的质量。

表1 2种碎石不同比例时所用质量

Tab.1 Masses of two kinds of aggregate with different proportions

$m_1:m_2$	$m_1/g$	$m_2/g$
4.5:1	4 377.1	972.7
4:1	4 360.6	1 090.2
3.5:1	4 367.6	1 247.8
3:1	4 171.7	1 390.6
2.5:1	3 887.1	1 554.8
2:1	3 616.4	1 808.2
1.5:1	3 241.6	2 161.1
1:1	2 677.8	2 677.8

由表1可以看出, $m_1$ 与 $m_2$ 的比例由4.5变化到3.5的过程中,在填满容量筒时, $m_1$ 的变化很小,而 $m_2$ 却不断增大。这说明在这几组中,1~2 cm碎石不断填充1~3 cm碎石之间的空隙而没有产生干涉现象,以此可以初步判断这几组混合料为骨架嵌

挤结构。并且可以预测当两者比例是3.5时空隙率最小,也即最为密实。

利用上述计算空隙率的方法,选取了质量比为3.5的组合,进一步判断这种比例的混合料是否为骨架嵌挤型结构。经测定1~3 cm碎石在自然堆积状态下的骨架空隙率VCA为47.74%,如果混合料在压实状态下1~3 cm碎石的骨架空隙率VCA<sub>mix</sub>小于等于47.74%,则可以确定此种结构为骨架嵌挤结构。按照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009)的方法,采用振动成型制备直径×高=Φ150 mm×150 mm的标准圆柱形试件。经测得,混合料在压实状态下粗骨料骨架空隙率VCA<sub>mix</sub>=44.88%,小于堆积状态下的骨架空隙率47.74%,因此可以确定当 $m_1:m_2=3.5:1$ 时,混合料为骨架嵌挤结构,自然可知质量比为4.5:1、4:1的混合料也是骨架嵌挤结构。

#### 3.2 结构密实度的控制

不同比例下混合料的密实程度可以用其空隙率来表示,将不同比例的1~3 cm碎石和1~2 cm碎石分3层填入一定容积的容量筒,每层都进行捣实,将石料填满容量筒后按下式计算出空隙率VV:

$$VV = \left(1 - \frac{V_1 + V_2}{V}\right) \times 100,$$

式中, $V_1$ 为1~3 cm碎石的体积; $V_2$ 为1~2 cm碎石的体积; $V$ 为容量筒的容积。

将1~3 cm碎石和1~2 cm碎石的不同质量比与对应空隙率的关系绘制成曲线,见图2。

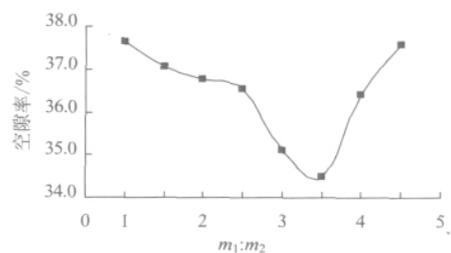


图2 2种碎石不同质量比与空隙率关系图

Fig.2 Relation between mass ratio and voids of two kinds of aggregate

由图2可以看出, $m_1$ 与 $m_2$ 的比例由1增加至3.5的过程中,混合料的空隙率不断减小; $m_1$ 与 $m_2$ 的比例由3.5增加至4.5的过程中,混合料的空隙率又不断增加,当 $m_1:m_2=3.5$ 时,混合料的空隙率达到最小为34.49%。

当1~3 cm碎石与1~2 cm碎石的质量比小于3.5时,由于1~2 cm的碎石过多,除了一部分填充

1~3 cm 碎石嵌挤形成的空隙外, 还有多余的一部分碎石, 此多余的碎石便产生了干涉作用, 因此  $m_1$  与  $m_2$  比例为 1~3.5 范围时, 1~2 cm 碎石越多产生干涉作用越大, 空隙率也就越大。

当 1~3 cm 碎石与 1~2 cm 碎石的质量比大于 3.5 时, 由于 1~2 cm 碎石数量较少, 粗集料形成的空隙没有完全被填满。因此在比例为 3.5~5 的范围内, 随着比例的增大, 用来填充空隙的 1~2 cm 的碎石数量越来越小, 空隙率也就越来越大。

由此可以看出, 在所有比例组合中, 当 1~3 cm 碎石与 1~2 cm 碎石的质量比为 3.5 时, 混合料空隙率最小, 上文已经证实此比例的混合料为骨架嵌挤结构, 因此, 此比例下混合料为骨架密实结构。

### 3.3 级配确定

按照以上确定的 2 种碎石的质量比, 计算填充剩余空隙的中砂质量, 其具体计算过程如下:

(1) 由 1~3 cm 碎石和 1~2 cm 碎石体积  $V_1$ 、 $V_2$  及总体积  $V$ , 计算出剩余空隙的体积;

(2) 在细集料填充空隙的过程中会不可避免地产生干涉现象, 因此在确定中砂的用量时预留出 10% 的空隙, 也即剩余空隙体积的 90% 便为中砂的体积;

(3) 根据 1~3 cm 碎石和 1~2 cm 碎石以及中砂的体积计算出各自质量。

集料的配合比为 1~3 cm 碎石: 1~2 cm 碎石: 中砂 = 58: 17: 25。

应用以上方法, 对只采用 1~3 cm 碎石和中砂构成骨架密实结构得到两者的比例为 1~3 cm 碎石: 中砂 = 61: 39。

按照石料的筛分结果和规范推荐的级配范围, 确定的对照组混合料配合比为 1~3 cm 碎石: 1~2 cm 碎石: 中砂 = 20: 35: 45。

## 4 骨架密实结构的性能研究

本次共对 3 组混合料级配进行性质对比, 其级配曲线见图 3。

图 3 中, 第 1 组、第 2 组的级配分别为按照本文介绍的方法设计, 第 3 组按传统级配方法确定, 本次主要对这 3 组级配混合料进行力学性能和干缩特性的对比。

### 4.1 最佳含水量与最大干密度的测定

对 3 组级配的集料分别成型了含水量为 3%、4%、5%、6%、7% 的试件。在试验过程中, 第 1

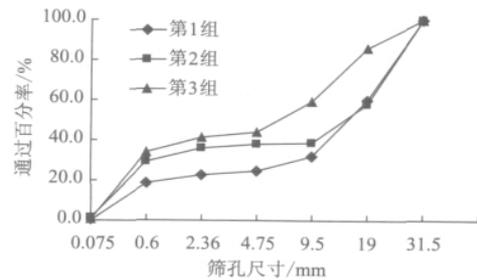


图 3 混合料的级配曲线

Fig. 3 Gradation curves of aggregates

组和第 2 组的混合料随着含水量的增加密度一直增加, 均没有达到密度峰值, 并且在含水量为 6% 时均已经开始出现泌水、离析的现象, 当含水量为 7% 时水泥砂浆飞溅, 试件很难成型, 也就无法测得其密度, 这 3 组混合料的含水量与干密度曲线见图 4。对于第 1、第 2 组材料, 粗集料含量大, 中砂含量不大, 这种混合料和易性不佳, 此时水分主要起润滑作用, 也即水分越多混合料就越易压实, 从而密度不断增大。当含水量为 5% 时, 试件在成型时未出现泌水现象而且和易性较好, 因此三者均选用 5% 的含水量, 干密度分别为 2.431、2.375、2.321  $\text{g}/\text{cm}^3$ 。

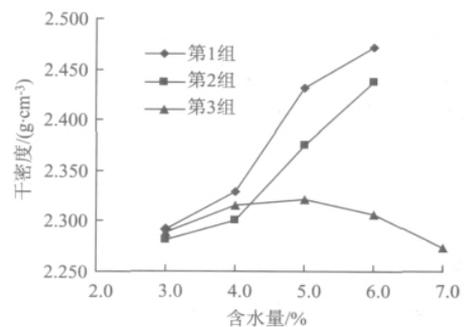


图 4 含水量 - 干密度曲线图

Fig. 4 Water content vs. dry density

### 4.2 强度对比

本次试验测定 3 种级配成型试件的无侧限抗压强度来对比其强度性能, 按照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009) 的方法进行 7 d 无侧限抗压强度测试, 平均抗压强度见图 5。

第 1 组的骨架密实型级配水泥稳定碎石混合料试件 7 d 无侧限抗压强度是三者中最高的。混合料中形成骨架的粗集料所占比例大, 1~3 cm 的粗骨料相互嵌挤形成强度, 1~2 cm 的骨料填充空隙并也相互嵌挤形成强度, 这样便使混合料整体强度很高。在试验中, 经常会出现压力机的加载速率为零后突然速率又回升的现象, 这表明试件较大粒径的粗集料

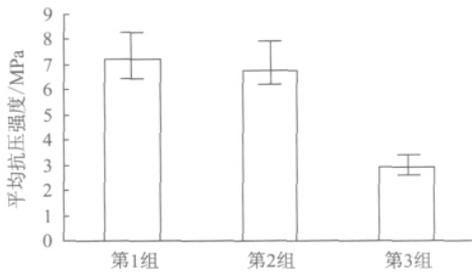


图5 3种级配混合料7 d无侧限抗压强度

Fig. 5 The 7 d unconfined compressive strength of three kinds of mixture

被破坏后,由次一级的骨料承受压力继续形成强度,这也是此种结构能够形成高强度的原因之一。

第2组中虽然也是骨架密实型级配,但是其砂的含量较多,在1~3 cm的集料相互嵌挤形成强度后,并没有粒径相对较小的骨料填充空隙继续嵌挤形成强度,而是由砂填充其空隙,这样混合料的整体强度便低于第1组。

第3组试件的粗集料不能够完全相互嵌挤形成强度,强度主要由部分集料的嵌挤作用、细集料与水泥水化产物形成的胶结料以及胶结料与骨料间的作用形成,因而整体强度较小。

在试验过程中,前2组试件被压坏时,只有被压坏的断面石料破碎,其他部位的石料骨架之间仍然嵌挤很紧密构成整体,而第3组的试件在被压坏时便松散碎裂,不能成为一个整体。

由此可以看出,利用本文介绍的方法所成型的骨架密实型级配混合料具有很好的强度特性。

#### 4.3 干缩特性

水泥稳定材料在成型后由于水分的减少,在结构内部会发生一系列的作用而引起材料产生干缩现象<sup>[17-18]</sup>,因此材料的干缩特性直接影响着道路的路用性能和使用寿命。

本次试验对3种级配混合料成型的试件进行了干缩特性的对比。将3种级配的混合料制成100 mm × 100 mm × 400 mm的梁式试件,经过7 d保湿养生后将试件安置在基座上,然后两端安置千分表(图6),测得试件的变形值,通过称重可测出试件的失水量,从而计算出干缩系数。



图6 干缩试验装置示意图

Fig. 6 Schematic diagram of dry shrinkage test equipment

从安装好试件开始,每隔24 h读一次数,连续观测7 d,将数据统计后按下式计算出收缩系数,试验结果见图7。

$$\alpha_d = \frac{\sum \varepsilon_i}{\sum \omega_i}$$

式中, $\alpha_d$ 为总干缩系数; $\varepsilon_i$ 为第*i*次干缩应变; $\omega_i$ 为第*i*次失水率。

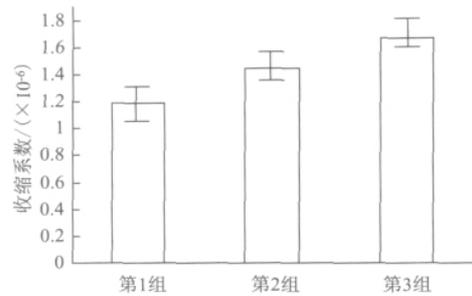


图7 3种级配混合料7 d干缩试验结果

Fig. 7 Results of 7 d dry shrinkage test for three kinds of mixture

由图7可以知,第1组的收缩变形最小,第3组的最大。其原因有:(1)混合料的干缩性能受集料的种类影响很大,第1、2组的粗集料含量较多,材料的比表面积和含水量便较少,因此降低了材料的干缩性能<sup>[19]</sup>;(2)第3组中含有的中砂较多,而中砂有较强的饱水能力,在材料干燥后中砂失水较多,其产生的干缩变形也就较大<sup>[20]</sup>;(3)由于第1组、2组中粗骨料形成紧密的嵌挤结构,可以抵抗一部分因材料失水而产生的收缩应力,从而减小收缩量。

#### 5 结论

(1) 利用体积法设计间断级配水泥稳定碎石的配合比,此种结构具有良好路用性能。

(2) 通过粗骨料的间隙率和混合料的空隙率2个指标分别控制混合料是骨架嵌挤结构和密实的。

(3) 运用该设计思路进行了具体试验,将此结构与传统级配曲线确定的混合料结构进行了力学性能和干缩性能的对比,均取得了良好的效果。

(4) 此方法是通过具体的试验确定混合料的级配,因此兼顾了不同石料的物理特性,更加灵活、有针对性。

参考文献:

References:

[1] 王龙,冯德成.提高级配碎石基层使用性能的方法[J].中国公路学报,2006,19(4):40-45.

WANG Long, FENG Decheng. Methods for Improving

- Using Performance of Graded Broken Stone Base [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19 (4): 40-45.
- [2] 张宗涛, 刘中林, 郝培文, 等. 间断密级配沥青混合料配合比设计方法 [J]. 西安公路交通大学学报, 2001, 21 (4): 22-25.  
ZHANG Zongtao, LIU Zhonglin, HAO Peiwen, et al. Design Method of GAP-graded HMA [J]. Journal of Xi'an Highway University, 2001, 21 (4): 22-25.
- [3] 谭忆秋, 张肖宁, 郭祖辛. 用体积法设计 SMA 混合料的配合比 [J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1999, 32 (3): 105-110.  
TAN Yiqiu, ZHANG Xiaoning, GUO Zuxin. Designing the Gradation of Stone Matrix Asphalt Mixtrure by Void Design Procedure [J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 1999, 32 (3): 105-110.
- [4] 朱梦良, 张起森, 陈强. 沥青玛蹄脂碎石混合料的集料级配优化 [J]. 中国公路学报, 2001, 14 (2): 1-5.  
ZHU Mengliang, ZHANG Qisen, CHEN Qiang. Optimizations of Aggregate Gradation for Stone Mastic Asphalt Mixture [J]. China Journal of Highway and Transport, 2001, 14 (2): 1-5.
- [5] 谭积青, 张肖宁. 沥青混合料体积设计及其效果评价 [J]. 公路交通科技, 2005, 22 (6): 1-5.  
TAN Jiqing, ZAHNG Xiaoning. Volume Design of Asphalt Mixture and Its Effect Evaluation [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22 (6): 1-5.
- [6] 姚辉, 李亮, 应荣华, 等. 采用贝雷法的冷再生混合料级配设计研究 [J]. 公路交通科技, 2011, 28 (1): 7-12.  
YAO Hui, LI Liang, YING Ronghua, et al. Research of Gradation Design of Cold Recycled Mixture Based on Bailey Method [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28 (1): 7-12.
- [7] 陈忠达, 袁万杰, 郑东启. 级配理论应用研究 [J]. 重庆交通学院学报, 2005, 24 (4): 44-45.  
CHEN Zhongda, YUAN Wanjie, ZHENG Dongqi. Study on The Application of Grading Theory [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2005, 24 (4): 44-45.
- [8] HARMAN T, D'ANGELO J, BUKOWSKI J. Superpave Asphalt Mixture Design [M] //FHWA National Asphalt Training Manuals. Washington, D. C.: FHWA, 2002.
- [9] 李晓. 对间断级配混凝土的理论探讨 [J]. 铁道工程学报, 1998 (2): 134.  
LI Xiao. Theoretical Exploration on Gap Grading of Concrete [J]. Journal of Railway Engineering Society, 1998 (2): 134.
- [10] 陈忠达, 袁万杰, 高春海. 多级嵌挤密实级配设计方法研究 [J]. 中国公路学报, 2006, 19 (1): 32-33.  
CHEN Zhongda, YUAN Wanjie, GAO Chunhai. Research on Design Method of Multilevel Dense Built-in Gradation [J]. China Journal of Highway and Transport. 2006, 19 (1): 32-33.
- [11] 葛折圣, 夏晖. 基于改进粗集料空隙填充法的密级配沥青混合料设计 [J]. 公路交通科技, 2011, 28 (2): 20-24.  
GE Zhesheng, XIA Hui. Designing of Dense Discontinuous Graded Asphalt Mixture Based on Improved Coarse Aggregate Void Filling Method [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28 (2): 20-24.
- [12] 陆阳, 周永江, 廖敬梅. 粗级配沥青混合料骨架结构的细观分析 [J]. 公路交通科技, 2008, 25 (2): 1-5.  
LU Yang, ZHOU Yongjiang, LIAO Jingmei. On the Microscopic Aspect of Skeleton Structure of Asphalt Mixture with Coarse Gradation [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25 (2): 1-5.
- [13] 彭波, 袁万杰, 李晓华, 等. 贝雷法在 SMA-16 型集料级配设计中的应用 [J]. 公路交通科技, 2005, 22 (10): 23-26.  
PENG Bo, YUAN Wanjie, LI Xiaohua, et al. Baley Method for Aggregate Grading Design of SMA-16 [J]. Journal of Highway and Transportation on Research and Development, 2005, 22 (10): 23-26.
- [14] 邱颖峰, 梁亚军, 许志鸿. 对骨架密实结构判断标准的改进研究 [J]. 公路交通科技, 2008, 25 (8): 10-14.  
QIU Yingfeng, LIANG Yajun, XU Zhihong. Study on Improvement of Judgment Criterion for Skeleton and Dense Texture [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25 (8): 10-14.
- [15] 胡力群, 沙爱民, 瓮优灵. 骨架孔隙水泥结构稳定碎石配比设计及路用性能 [J]. 公路交通科技, 2006, 23 (6): 22-26.  
HU Liqun, SHA Aimin, WENG Youling. Mixture Component Design of Skeleton-pore Cement Stabilized Aggregate Material and Its Performance Research [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23 (6): 22-26.
- [16] 王家主, 吴少鹏. 骨架密实型沥青混合料设计 [J]. 公路交通科技, 2006, 23 (11): 31-35.

1998.  
ZHANG Dengliang. Asphalt Pavement [M]. Beijing: China Communications Press, 1998.
- [2] 梁春雨. 30#硬质沥青用于沥青路面中下面层的试验研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2007.  
LIANG Chunyu. Test Study of No. 30 Hard Grade Asphalt Used for Mid or Lower Surface Layers of Asphalt Pavement [D]. Changchun: Jilin University, 2007.
- [3] 邱自萍, 郑木莲. 高模量沥青混凝土路面力学数值模拟 [J]. 城市道路与防洪, 2011 (6): 258-261.  
QIU Ziping, ZHENG Mulian. Numerical Simulation of Mechanics Behavior for High Modular Asphalt Concrete Pavement [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2011 (6): 258-261.
- [4] 李正全, 郝彤途, 何新原. 高模量沥青混凝土力学性能研究 [J]. 交通标准化, 2011 (20): 47-50.  
LI Zhengquan, HAO Tongtu, HE Xinyuan. Mechanical Property of High-modulus Asphalt Concrete [J]. Communications Standardization, 2011 (20): 47-50.
- [5] 肖庆一, 杨维涛, 田稳苓, 等. 高模量沥青混凝土路用性能试验研究 [J]. 中国港湾建设, 2011 (3): 42-48.  
XIAO Qingyi, YANG Weitao, TIAN Wenling, et al. Experimental Study on Road Use Performance of High Modulus Asphalt Concrete [J]. China Harbour Engineering, 2011 (3): 42-48.
- [6] BS EN 12591: 2009, Bitumen and Bituminous Binders—Specifications for Paving Grade Bitumens [S].
- [7] 马峰, 傅珍. 硬质沥青和高模量沥青混凝土在法国的应用 [J]. 中外公路, 2008, 28 (6): 221-223.  
MA Feng, FU Zhen. Application of Hard Asphalt and High Modulus Asphalt Concrete in France [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2008, 28 (6): 221-223.
- [8] 覃勉, 苑红凯. 硬质沥青及混合料的高温性能评价 [J]. 城市道桥与防洪, 2010 (1): 32-39.  
TAN Mian, YUAN Hongkai. Evaluation of High Temperature Performance to Hard Asphalt and Mixture [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2010 (1): 32-39.
- [9] JTG F40—2004, 公路沥青路面施工技术规范 [S].  
JTG F40—2004, Technical Specifications for Construction of Highway Asphalt Pavement [S].
- [10] 王旭东. 一种新型沥青混合料体积设计方法的探讨 [J]. 上海公路, 2011 (2): 1-2.  
WANG Xudong. Discussion on a New Volume Design Method for Asphalt Mixture [J]. Shanghai Highways, 2011 (2): 1-2.
- [11] WANG Xudong, ZHANG Lei. Optimal Bitumen-aggregate Ratio Selection Method of Hot Mix Asphalt Based on Closest Compaction Condition [J]. Journal of Testing and Evaluation, 2009, 37 (5): 490-495.
- [12] JTJ 052—2000, 公路工程沥青及沥青混合料试验规程 [S].  
JTJ 052—2000, Standard Test Methods of Bitumen and Bituminous Mixtures for Highway Engineering [S].
- [13] JTG D50—2006, 公路沥青路面设计规范 [S].  
JTG 050—2006, Specifications for Design of Highway Asphalt Pavement [S].
- 
- (上接第27页)
- WANG Jiazhu, WU Shaopeng. Design of Skeletal Dense Structure for Asphalt Mixture [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23 (11): 31-35.
- [17] 沙庆林. 高等级公路半刚性基层沥青路面 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1999.  
SHA Qinglin. Semi-rigid Asphalt Pavement of High Grade Highway [M]. Beijing: China Communications Press, 1999.
- [18] 廖公云, 黄晓明. 水泥稳定粒料集料级配干缩性能研究 [J]. 公路交通科技, 2002, 19 (2): 41-44.  
LIAO Gongyun, HUANG Xiaoming. Dry Shrinkage Properties Study on Aggregate Grades in Cement-stabilized Materials. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2002, 19 (2): 41-44.
- [19] 张登良, 郑南翔. 半刚性基层材料收缩机理分析: 半刚性基层抗裂性能研究之一 [J]. 西安公路学院学报, 1990, 10 (2): 4-6.  
ZHANG Dengliang, ZHENG Nanxiang. Analysis of Contraction Mechanism for the Semi-rigid Base Course Materials: The First Part of Study of the Anti-cracking Performance of Semi-rigid Base Course [J]. Journal of Xi'an Highway Institute, 1990, 10 (2): 4-6.
- [20] 田林, 冯德成. 骨架密实型水泥稳定级配碎石的干缩特性 [J]. 低温建筑技术, 2010 (7): 3-5.  
TIAN Lin, FENG Decheng. Study on Evaporation Shrinkage of Cement Stabilized Grade Stone with Framework and Dense Structure [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2010 (7): 3-5.