

基于粗集料空隙填充法的 OGFC 混合料组成设计

王昌引 葛折圣¹

(安徽省高速公路控股集团有限公司,合肥 230052;华南理工大学¹,广州 510640)

摘要 为准确评价 OGFC 混合料中粗集料的嵌挤特性,提出了粗集料骨架间隙率最小值的测定方法和骨架嵌挤的新标准;改进了粗集料空隙填充法,应用于设计 OGFC 混合料;并通过车辙试验和冻融劈裂试验评价了所设计混合料的路用性能,技术指标均满足《公路沥青路面施工规范》的要求。

关键词 道路工程 OGFC 混合料 设计方法 改进

中图法分类号 U 414.1; **文献标志码** A

开级配抗滑磨耗层 (Open-graded Friction Course, 简称 OGFC) 混合料能将路表的水通过磨耗层的连通空隙及时向路面边缘排除,故一般称为排水性路面。欧、美、日等发达国家早在 20 世纪 70 年代开始大范围应用。目前,也已经在我国西安、江苏、广西、深圳等地的高速公路、城市快速路路面结构中得到一定规模的推广应用。但是,现有的 OGFC 混合料设计方法还存在一些重要的技术问题,需要通过进一步的研究解决。

首先提出了粗集料骨架间隙率最小值的测定方法和密断级配混合料骨架嵌挤的新标准,在此基础上对粗集料空隙填充法进行了改进;然后,通过试验验证了用改进的粗集料空隙填充法设计出的 OGFC 沥青混合料具有优良的路用性能。

1 粗集料空隙填充法基本原理

20 世纪 90 年代初,张肖宁教授等先于美国贝雷法提出了一种新型沥青混合料组成设计方法,即粗集料空隙填充法 (Course Aggregate Void Filling method, 记为 CAVF 法)^[1-3]。通过实测粗集料骨架

间隙率,使细集料体积、沥青体积、矿粉体积及沥青混合料最终设计空隙体积之总和等于粗集料骨架间隙率。另外,集料选择时,为了避免颗粒的干涉,细集料颗粒不能太大,一般间断 (2.36 ~ 4.75) mm 或 (1.18 ~ 4.75) mm 档细集料,以利于主骨料充分嵌挤。按照上述体积关系,粗集料、细集料、矿粉的质量百分率、油石比、捣实状态下粗集料松装间隙率及混合料设计空隙率之间满足以下方程

$$q_c + q_f + q_p = 100 \quad (1)$$

$$\frac{q_c}{100\gamma_s}(V_{DRC} - V_v) = \frac{q_f}{\gamma_f} + \frac{q_p}{\gamma_p} + \frac{q_a}{\gamma_a} \quad (2)$$

式中: q_c 、 q_f 、 q_p 分别为粗集料、细集料、矿粉的质量百分率,%; q_a 为油石比,%; V_{DRC} 为干捣实状态下粗集料松装间隙率,%; V_v 为设计混合料的空隙率,%; γ_s 为粗集料松方毛体积相对密度; γ_f 、 γ_p 分别为细集料和矿粉的表现相对密度; γ_a 为沥青的相对密度。

CAVF 法强调粗集料之间的嵌挤作用,方便实用,特别适合生产配合比配制,具有许多优点。但在推广应用这一方法时,还存在一些重要的技术问题,需要通过进一步的研究予以解决。

2 粗集料骨架嵌挤标准的改进

粗集料骨架嵌挤形成标准 $V_{mix} \leq V_{DRC}$ 是美国在引进沥青马蹄脂碎石混合料 SMA 的过程中,为了比

欧洲更加强调粗骨架的重要性而提出来的^[4]。在美国的 SMA 设计指南中,规定 V_{DRC} 的测量方法采用干捣实法确定,是利用粗集料试件的体积法测量的毛体积密度来计算的。对于混合料中粗集料间隙率 V_{mix} 则是应用马歇尔击实试件的水中重法测得的毛体积密度来计算。对比 V_{DRC} 和 V_{mix} 的测量方法可知,两者的试验方法有如下不同:一是压实方法不同,前者用铁棒捣插密实,后者为重锤冲击压实,两者的压实功能无可比性;二是试验测量精度不同,前者密实后体积为 10 L(试样直径 23.7 cm,试样高度 22.7 cm),后者压实体积约 0.5148 L(试样直径 101.6 cm,试样高度 6.35 cm);三是计算 VCA 时,所用密度指标的测量体系不同,前者在测量时,试样体积已经固定,为测量筒的容积 10 L,即计算 VCA_{DRC} 用的是体积法毛体积密度,它包括了试样表面的所有空隙;而计算 V_{mix} 时,用的是水中重法毛体积密度,故 V_{mix} 未包括试样表面的粗大空隙。为了克服干捣实法测定 V_{DRC} 的上述种种不足,将粗集料加适量沥青、矿粉后与混合料同法成型,并采用同法计算得出的 V_{mix} 称作粗集料骨架间隙率的最小值 V_{min} 。并提出新的粗集料骨架形成标准,即

$$V_{mix} \leq \alpha V_{min} \quad (3)$$

式(3)中, $\alpha = \frac{V_{mix}}{V_{min}} = 1.0 \sim 1.2$, 为干涉系数,表示细集料和沥青胶浆对粗集料骨架的干涉程度。 V_{min} 的计算方法为

$$V_{min} = 100 - \frac{\gamma_f}{\gamma_{ce}} \times P_{ca} \quad (4)$$

式(4)中: V_{min} 为粗集料间隙率最小值,%; γ_f 为用沥青混合料的毛体积相对密度; P_{ca} 为沥青混合料中粗集料的比例,%; γ_{ce} 为粗集料的合成有效相对密度。

3 粗集料空隙填充法的改进

原混合料体积平衡方程中未考虑集料吸收沥青体积,式(5)更精确的表达了混合料的体积关系。

$$\left(\frac{q_f}{\gamma_f} + \frac{q_p}{\gamma_p} \right) M = \frac{V}{100} (\alpha V_{min} - V_V - V_{be}) \quad (5)$$

式(5)中, M 为混合料的质量, kg; V 为混合料的体积; V_{be} 为有效沥青体积, %。

$$\text{令: } V = \frac{q_c M}{\gamma_s}; \alpha V_{min} = V_{mix} \circ$$

则式(5)演变成

$$\frac{q_f}{\gamma_f} + \frac{q_p}{\gamma_p} = \frac{q_c}{100\gamma_s} (\alpha V_{min} - V_V - V_{be}) \quad (6)$$

而混合料中粗集料矿料间隙率 V_{MA} 满足: $V_{MA} = V_V + V_{be}$ 。设计混合料时,可将 V_V 和 V_{be} 作为已知变量,从而实现了对于 V_{MA} 的控制。OGFC-13 混合料的 $V_{be} = (10 \sim 11)\%$ 。

解式(1)和式(6)可得粗、细集料的质量百分比。然后,按照式(7)~式(9),由 V_{be} 反算出 q_a 。

$$q_{be} = \frac{V_{be} \gamma_a}{(1 - 0.01 V_{MA}) \gamma_{sb}} \quad (7)$$

$$q_{ba} = \left(\frac{1}{\gamma_{sb}} - \frac{1}{\gamma_{se}} \right) \gamma_a \times 100 \quad (8)$$

$$q_a = q_{ba} + q_{be} \quad (9)$$

式中: q_{be} 为有效油石比,%; q_{ba} 为被集料吸入的油石比,%; γ_{se} 为合成矿料有效相对密度; γ_{sb} 合成矿料毛体积相对密度。

4 用改进的粗集料空隙填充法设计 OGFC 混合料

粗集料空隙填充法设计 OGFC 混合料的流程如下:首先,根据经验或泰波公式设计主骨架,并实测骨架空隙率最小值;其次,选择 3 个矿粉和沥青用量,用上述质量和体积平衡方程计算确定粗细集料用量,由此求出混合料的设计级配;然后,由析漏、飞散试验确定最佳沥青用量和设计级配;最后,通过试验评价设计混合料的路用性能。

选取符合规范要求的粗、细集料。级配组成见表 1。

实测细集料的表观相对密度为 2.653,矿粉表观相对密度为 2.686,沥青相对密度为 1.028,粗集料紧装密度 γ_s 为 2.289 g/cm³,粗集料 $V_{CA_{min}} = 36.56\%$ 。干涉系数设定为 $\alpha = 1.1$ 。设计空隙率 $V_V = 20\%$ 。拟定 3 种不同的 $V_{be} = 8\%$ 、 10% 和 12% 。 $q_p = 2\%$ 。按照式(7)~式(9),由 V_{be} 反算出 q_a 。表 2 给出了不同沥青、不同矿粉用量对应的设计级配的计算结果。

表 1 矿料的级配组成

筛孔尺寸/mm	粗集料	细集料	矿粉
16	100	100	100
13.2	91.8	100	100
9.5	42.8	100	100
4.75	2.6	100	100
2.36	0.1	90.5	100
1.18	0.1	66.8	100
0.6	0.1	45.1	100
0.3	0.1	33.2	100
0.15	0.1	25.8	99.3
0.075	0.1	17.6	79.6

表 2 不同沥青、矿粉用量的级配计算结果

级配	A	B	C	
$V_{\text{be}}/\%$	9	10	11	
$q_{\text{a}}/\%$	5.2	5.8	6.5	
$q_{\text{c}}/\%$	79.5	80.3	81.0	
筛孔尺寸/mm	16	100.0	100.0	100.0
	13.2	93.5	93.4	93.4
	9.5	54.5	54.1	53.7
	4.75	22.6	21.8	21.1
	2.36	18.8	18.1	17.5
	1.18	14.4	13.9	13.4
	0.6	10.4	10.1	9.7
	0.3	8.2	8.0	7.7
	0.15	6.8	6.6	6.5
	0.075	4.9	4.8	4.7

采用 ESSO 70 号道路石油沥青掺加 15% 的 TPS 进行改性后得到的高黏度改性沥青,技术指标如表 3 所示。

表 3 高粘改性沥青指标

指标	ESSO 70 号沥青 + 15% TPS	规范要求
25℃ 针入度/0.1mm	41.7	≥40
软化点/℃	95.2	≥80
60℃ 动力黏度 Pa·s	> 300 000	≥20 000

用析漏和飞散试验确定最佳沥青用量。表 4 给出了 3 种设计级配的混合料的析漏和飞散试验结果。由此选定级配 B 和最佳油石比为 5.8%。

表 4 析漏和飞散试验结果

级配	油石比/%	析漏损失/%	飞散损失/%
A	5.2	0.17	12.12
B	5.8	0.29	6.32
C	6.5	1.13	5.13

通过高温车辙试验、冻融劈裂试验评价了级配 B 对应的混合料的高温抗车辙性能和抗水损害性能。试验结果如表 5、表 6 所示。结果表明,所设计的沥青混合料性能完全满足《公路沥青路面施工规范》的技术要求。

表 5 车辙试验结果

油石比/%	动稳定度/(次·mm ⁻¹)				
	1	2	3	平均	要求
5.8	6128	6900	6516	6515	≥3000

表 6 冻融劈裂试验结果

油石比 /%	无条件劈裂强度 /MPa	条件劈裂强度 /MPa	TSR /%	要求 /%
5.8	1.128	1.062	94.1	≥85

5 结 语

为准确评价 OGFC 混合料中粗集料的嵌挤特性,提出了粗集料骨架间隙率最小值的测定方法和粗集料骨架嵌挤的新标准;据此,改进了粗集料空隙填充法,应用于设计 OGFC 混合料;并通过车辙试验和冻融劈裂试验评价所设计混合料的路用性能,这些技术指标均满足《公路沥青路面施工规范》的要求。

研究表明,改进的粗集料空隙填充法具有一般性,可广泛应用于设计 FAC、SMA、OGFC 等密断级配的沥青混合料。

参 考 文 献

1 吴旷怀,张肖宁. 沥青混合料设计综述. 广州大学学报:自然科学版. 2005;4(5):456—461

2 张肖宁,郭祖辛,吴旷怀. 按体积法设计沥青混合料. 哈尔滨建筑大学学报,1995;28(2):28—36

3 张肖宁. 道路交通安全与沥青路面技术的进步. 哈尔滨建筑大学学报,1999;32(2):93—98

4 卢永贵,赵 可. SMA 骨架标准研究. 西南交通大学学报. 2002;37(1):14—18

2

Smith S B, Finci L, Bustamante C. Direct mechanical measurement of the elasticity of single DNA molecules by using magnetic beads. *Science*, 1992, 258(5085): 1122—1126

3

Bustamante C, Bryant Z. Ten years of tension: single-molecule DNA mechanics. *Nature*, 2003;421:423—427

4

Mesirov J P, Schulten K, Sumners D W. Mathematical approaches to biomolecular structure and dynamics. New York: Springer, 1996

5

Yaoming S, John E H. The Kirchhoff elastic rod, the nonlinear Schrodinger equation, and DNA supercoiling. *J Chem Phys*, 1994; 101(6): 5186—5200

6

冯 康 秦孟兆. 哈密尔顿系统的辛几何算法. 杭州:浙江科学技术出版社,20037 刘延柱, 薛 纭. 弹性细杆螺旋线平衡的动态稳定性. *力学季刊*, 2005; 26(1): 1—7

The Numerical Simulation of the Super-long Slender Elastic Rod Based on Hamiltonian Canonical Equation

ZHANG Guang-hui

(Department of Applied Mathematics of Suzhou College, Suzhou 234000, P. R. China)

[Abstract] The Hamiltonian canonical equation of unconstrained elastic rod is derived, and symplectic method is introduced to numerically simulate the structural features of the super-long slender elastic rod, which shows good structural preserving property in contrast to the traditional method.

[Key words] hamiltonian symplectic method the canonical equation numerical simulation

(上接第 4437 页)

Designing of Open-graded Friction Course Asphalt-mixture Based on Coarse Aggregate Void Filling Method

WANG Chang-yin, GE Zhe-sheng¹

(Anhui Expressway Holding Corporation, Hefei 230051, P. R. China ;South China University of Technology¹, Guangzhou 510641, P. R. China)

[Abstract] In order to evaluate the interlocking property of coarse aggregates in Open-graded Friction Course (OGFC) asphalt-mixture, a determination of the minimum of voids in coarse aggregate and the new standard of skeleton interlocking of this type of mixture were presented. Accordingly, the Coarse Aggregate Void Filling method (CAVF) was improved and applied to design this type of mixture. And then, road performances of the designed mixture were tested by rutting test and freeze-thaw split test. These technical indexes can satisfy the requirements of Technical Specifications for Construction of Highway Asphalt Pavements.

[Key words] highway engineering OGFC asphalt mixture design method improvement