

沥青碎石粗集料的相对比例

魏建国^{1,2}, 查旭东², 郑健龙², 王秉纲¹

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 长沙理工大学 公路工程学院, 湖南 长沙 410076)

摘 要:为了研究集料配比对沥青碎石基层骨架结构的影响,采用幂指数法和均匀设计法,对沥青碎石基层粗集料相对比例与粗集料骨架空隙率 $[VCA_{DRC}]$ 的关系进行了研究。对 8 种幂指数 n 值下的 $[VCA_{DRC}]$ 进行了比较;并对不同粗集料质量分数和 $[VCA_{DRC}]$ 进行了非线性回归分析。结果表明:泰波公式幂指数 n 值在 0.5~0.6 时, $[VCA_{DRC}]$ 值最小;级配中 26.5 mm 的质量分数与 $[VCA_{DRC}]$ 的相关性最好,且 $[VCA_{DRC}]$ 随着其质量分数的增加而降低;级配中 9.5 mm 的质量分数与 $[VCA_{DRC}]$ 的相关性次之;幂指数法和均匀设计法在确定沥青碎石基层粗集料相对比例方面具有一致性。

关键词:道路工程;沥青碎石;均匀设计法;粗集料;泰波公式

中图分类号:U416.214 **文献标志码:**A

Coarse aggregates' relative proportion of asphalt macadam

WEI Jian-guo^{1,2}, ZHA Xu-dong², ZHENG Jian-long², WANG Bing-gang¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. School of Highway Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, Hunan, China)

Abstract: In order to investigate the influence of aggregate gradation on skeleton structure of asphalt macadam base, the exponential value method and uniform design method were applied to analyze the relationship between coarse aggregates' relative proportion and the voids in the coarse aggregate $[VCA_{DRC}]$ of asphalt macadam base. The 8 levels of exponential value n were compared; and nonlinear regression analysis between quality content of the coarse aggregates and $[VCA_{DRC}]$ was conducted. It is found that the reasonable value of the exponential value n in Taibo formula is from 0.5 to 0.6, which can minimize the $[VCA_{DRC}]$ value. And it is also found that the correlation between 26.5 mm quality content of the aggregate gradation and the $[VCA_{DRC}]$ is the best, and the $[VCA_{DRC}]$ value reduces with the increase of the 26.5 mm quality content, the correlation between 9.5 mm quality content and the $[VCA_{DRC}]$ takes the second place. Finally, the exponential value method and uniform design method are found to have consistency in determining coarse aggregates' relative proportion of asphalt macadam base. 6 tabs, 2 figs, 12 refs.

Key words: road engineering; asphalt macadam; uniform design method; coarse aggregates; Taibo formula

收稿日期:2007-01-10

基金项目:国家自然科学基金项目(50208004);湖南省自然科学基金项目(07JJ6091)

作者简介:魏建国(1972-),男,河南信阳人,长沙理工大学副教授,长安大学博士研究生,E-mail:jianguowei9969@126.com

0 引言

据国外研究,大粒径沥青碎石基层可以大幅度地降低反射裂缝的危害,并具有良好的抗车辙能力^[1-8];但对大粒径沥青碎石基层的组成设计尚未进行深入的研究,大多是根据普通沥青混凝土矿料级配计算公式计算其级配,或根据实践经验和习惯用法进行级配设计^[9-10]。为了研究集料比对沥青碎石基层骨架结构的影响,本文主要从泰波公式^[11]不

同的幂指数 n 值和均匀设计法对应级配的粗集料骨架空隙率两个方面,对沥青碎石基层的粗集料相对比例进行研究。

1 幂指数法研究

1.1 级配初选

根据泰波公式,最大密度曲线幂指数 n 值取 0.3~1.0 时分别得到 8 种粗集料连续级配(表 1)。由表 1 可计算出各档粗集料粒径质量分数(表 2)。

表 1 不同幂指数 n 值对应的粗集料连续级配

幂指数 n 值	不同筛孔(mm)的通过率/%							
	37.00	31.50	26.50	19.00	16.00	13.20	9.50	4.75
0.3	100	95.3	90.5	81.9	77.8	73.4	66.5	54.0
0.4	100	93.8	87.5	76.6	71.5	66.2	58.1	44.0
0.5	100	92.3	84.6	71.7	65.8	59.7	50.7	35.8
0.6	100	90.8	81.9	67.0	60.5	53.9	44.2	29.2
0.7	100	89.3	79.2	62.7	55.6	48.6	38.6	23.8
0.8	100	87.9	76.6	58.7	51.1	43.8	33.7	19.4
0.9	100	86.5	74.1	54.9	47.0	39.5	29.4	15.8
1.0	100	85.1	71.6	51.4	43.2	35.7	25.7	12.8

表 2 不同幂指数 n 值对应的粗集料质量分数

幂指数 n 值	各档粗集料粒径(mm)的质量分数/%						
	31.5~37.0	26.5~31.5	19.0~26.5	16.0~19.0	13.2~16.0	9.5~13.2	4.75~9.5
0.3	10.2	10.5	18.7	8.9	9.5	15.0	27.2
0.4	11.1	11.2	19.5	9.1	9.4	14.6	25.1
0.5	12.1	11.9	20.2	9.2	9.4	14.1	23.1
0.6	13.0	12.6	20.9	9.3	9.3	13.6	21.3
0.7	14.0	13.3	21.6	9.3	9.2	13.1	19.5
0.8	15.0	14.1	22.2	9.3	9.0	12.6	17.8
0.9	16.0	14.8	22.8	9.3	8.9	12.0	16.2
1.0	17.0	15.5	23.3	9.3	8.7	11.5	14.7

各粒径粗集料的表观密度试验结果见表 3。

表 3 粗集料表观密度

筛孔孔径/mm	31.50	26.50	19.00	16.00	13.20	9.50	4.75
表观密度/(g·cm ⁻³)	2.780 1	2.760 5	2.746 9	2.778 8	2.798 3	2.805 2	2.746 8

1.2 级配比较

分别采用干捣实法和振动法测定表 2 中各级配对应的粗集料骨架的空隙率,得到幂指数 n 值对粗集料骨架空隙率 $[VCA_{DRC}]$ 的影响(图 1)。

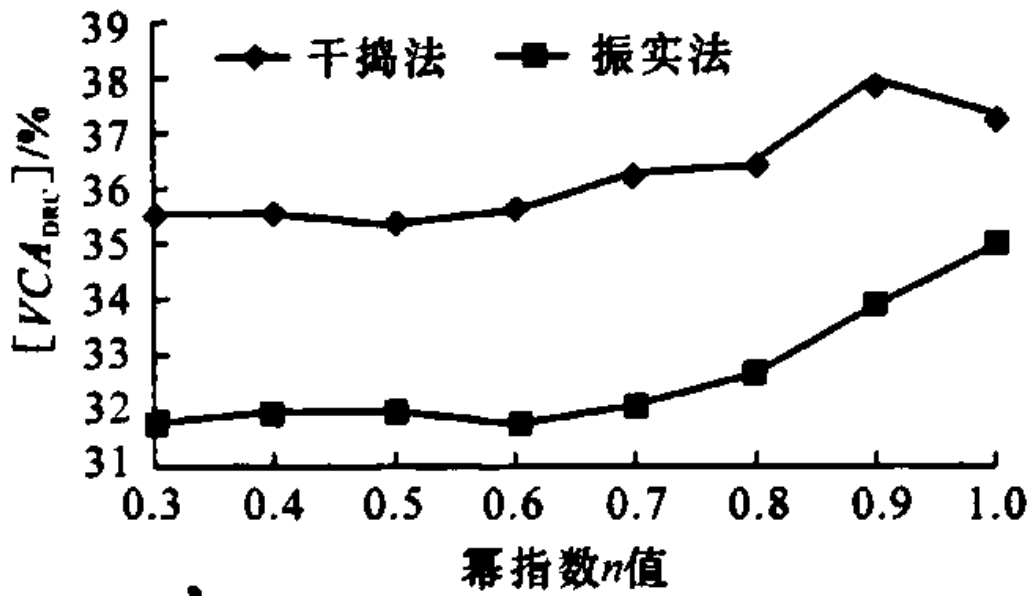


图 1 幂指数 n 值对 $[VCA_{DRC}]$ 的影响

从图 1 可看出,采用干捣法测定的 $[VCA_{DRC}]$ 均比振实法的要大,表明振实法能使粗集料更加密实。随着幂指数 n 值的增大, $[VCA_{DRC}]$ 呈增大趋势;当级配的幂指数 n 值为 0.5 时,干捣粗集料的 $[VCA_{DRC}]$ 的值最小。而对于振实法,当级配的幂指数 n 值为 0.3 或 0.6 时, $[VCA_{DRC}]$ 的值最小,而且在 0.3~0.6 之间变化非常小。可见,为使粗集料能够形成良好的骨架结构,应确保粗集料有较高的质量分数,幂指数 n 值为 0.5~0.6 较合适。

2 均匀设计试验

2.1 均匀设计法

均匀设计法^[12] 是只考虑试验点在试验范围内均匀分布的一种试验设计方法。此法与正交试验设

计相似,通过一套设计表进行试验设计。每个均匀设计表用 $U_N(q')$ 或 $U_N^*(q')$ 表示。其中: U 为均匀设计; N 为 N 次试验; q' 为第 s 个因素有 q 个水平; $*$ 表示均匀设计有良好的均匀性,应优先选用。

2.2 方案设计

进行粗集料级配设计时,由于各因素在总量中所占的比例不是独立的,而是粗集料各因素的总和为 1。因此,应该做配比试验设计。配比试验设计的方法通常有单纯形格子点设计、单纯形重心设计、轴设计和配比均匀设计。配比均匀设计由方开泰提出^[12],在轴设计基础上克服了其缺点。 s 种因素的试验范围为单纯型 T_s ,设有 N 种不同的配比(对应 N 次试验),这些配比对应 T_s 中的 N 个点,配比均匀设计是要这 N 个点在 T_s 中尽可能均匀散布,其设计步骤为:

(1) 给定 s 和 N ,查对应的均匀设计表得到生成向量 (h_1, \cdots, h_{s-1}) ,并由这些生成向量产生配方均匀设计表 $U_N^*(q^{s-1})$ 或 $U_N(q^{s-1})$ 。用 $\{q_k\}$ 计算 $U_N^*(q^{s-1})$ 或 $U_N(q^{s-1})$ 中的元素。

(2) 对每列 i ,计算 $\{q_k\}$ 在 $(0,1)$ 的变换值 c_{ki}

$$c_{ki} = \frac{2q_{ki} - 1}{2N}, \quad k = 1, \cdots, N \tag{1}$$

(3) 计算各行元素

$$x_{ki} = (1 - c_{ki}^{\frac{1}{s-1}}) \prod_{j=1}^{i-1} c_{kj}^{\frac{1}{s-1}}, i = 1, \cdots, s-1 \tag{2}$$

$$x_k = \prod_{j=1}^{s-1} c_{kj}^{\frac{1}{s-1}}, k = 1, \cdots, N \tag{3}$$

沥青碎石粗集料共分 6 档:26.5 ~ 31.5 mm、19.0 ~ 26.5 mm、16.0 ~ 19.0 mm、13.2 ~ 16.0 mm、9.5 ~ 13.2 mm、4.75 ~ 9.5 mm(粗集料粒径

为 31.5 ~ 37.0 mm 的质量分数一般少于 10%,对 $[VCA_{DRC}]$ 影响较小,为减少试验量,本研究不把它单独作为一个因素考虑),分为 6 个因素,分别以 $X_1、X_2、X_3、X_4、X_5、X_6$ 表示,对应各档粗集料粒径的质量分数。 $[VCA_{DRC}]$ 与各因素比例之间没有明显的函数关系,只有相关关系,而且可能还存在二次非线性的相关关系。此外,6 个因素的配比设计,有 5 个独立的因素,5 个变量的二次非线性回归方程包括 21 项。为得到较好的相关结论,回归方程的自由度不应小于 5,水平数至少为 26。比较水平数 26 ~ 31 的均匀偏差度 D ,可知水平数为 28 时的 D 值最小(表 4),因此选用 6 因素 28 水平的配比均匀设计。

6 因素 28 水平的均匀设计见表 5。粗集料配比均匀设计方案组成见表 6。

表 4 6 因素不同水平数的 D 值分布

水平数	26	27	28	29	30	31
D 值	0.182 8	0.263 3	0.157 8	0.238 4	0.162 1	0.225 1

2.3 级配比较

测定表 5 中 28 种配比对应的 $[VCA_{DRC}]$ 并进行二次回归分析,研究各档粗集料质量分数对 $[VCA_{DRC}]$ 的影响,结果如图 2 所示。

从图 2 拟合曲线的相关性可看出:

(1) $[VCA_{DRC}]$ 与粗集料粒径 26.5 mm 质量分数相关性最好, R^2 达到 0.575 6(振实法)、0.490 9(干捣法),且 $[VCA_{DRC}]$ 随着其质量分数的增加而减小。

(2) $[VCA_{DRC}]$ 与粗集料粒径 9.5 mm 的质量分数相关性次之, R^2 为 0.311 1(振实法)、0.280 6(干捣法),且 $[VCA_{DRC}]$ 随其质量分数的增加而减小。

表 5 均匀设计方案 $U_{28}(28^6)$

试验号	因素						试验号	因素					
	1	2	3	4	5	6		1	2	3	4	5	6
1	1	7	16	20	23	24	15	15	18	8	10	26	12
2	2	14	3	11	17	19	16	16	25	24	1	20	7
3	3	21	19	2	11	14	17	17	3	11	21	14	2
4	4	28	6	22	5	9	18	18	10	27	12	8	26
5	5	6	22	13	28	4	19	19	17	14	3	2	21
6	6	13	9	4	22	28	20	20	24	1	23	25	16
7	7	20	25	24	16	23	21	21	2	17	14	19	11
8	8	27	12	15	10	18	22	22	9	4	5	13	6
9	9	5	28	6	4	13	23	23	16	20	25	7	1
10	10	12	15	26	27	8	24	24	23	7	16	1	25
11	11	19	2	17	21	3	25	25	1	23	7	24	20
12	12	26	18	8	15	27	26	26	8	10	27	18	15
13	13	4	5	28	9	22	27	27	15	26	18	12	10
14	14	11	21	19	3	17	28	28	22	13	9	6	5

表 6 粗集料配比的均匀设计方案组成

序号	各档粗集料粒径的质量分数 / %						序号	各档粗集料粒径的质量分数 / %					
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆
1	55.3	13.7	5.5	4.2	4.2	17.1	15	12.3	9.7	27.7	21.0	2.6	26.7
2	44.3	9.3	25.7	8.0	5.2	7.5	16	11.2	2.9	4.9	70.2	3.3	7.5
3	38.3	4.6	7.4	38.2	7.2	4.3	17	10.1	40.8	13.7	5.1	15.7	14.6
4	34.0	0.3	27.5	4.7	28.1	5.4	18	9.0	21.5	1.3	24.5	32.0	11.7
5	30.6	23.2	3.9	14.0	0.5	27.8	19	8.0	11.4	17.4	44.3	17.9	1.0
6	27.8	13.2	19.4	25.6	3.2	10.8	20	7.0	4.0	65.8	2.4	2.6	18.2
7	25.3	6.4	3.0	5.5	26.7	33.1	21	6.0	48.8	7.3	11.6	8.9	17.4
8	23.2	1.0	19.5	15.8	26.8	13.7	22	5.2	24.4	35.2	21.1	7.8	6.3
9	21.2	28.9	0.3	27.6	19.2	2.8	23	4.3	13.1	9.4	4.7	52.6	15.9
10	19.4	16.1	12.7	2.4	2.6	46.8	24	3.5	5.1	35.2	14.4	41.1	0.7
11	17.8	8.1	46.2	6.5	5.7	15.7	25	2.6	61.8	2.5	17.1	2.6	13.4
12	16.3	1.9	11.9	33.7	17.5	18.7	26	1.9	27.5	21.4	1.3	18.0	29.9
13	14.9	34.5	23.1	0.2	19.0	8.3	27	1.1	15.0	2.6	17.0	37.9	26.4
14	13.6	18.8	6.7	11.4	45.1	4.4	28	0.3	6.4	22.0	32.0	31.6	7.7

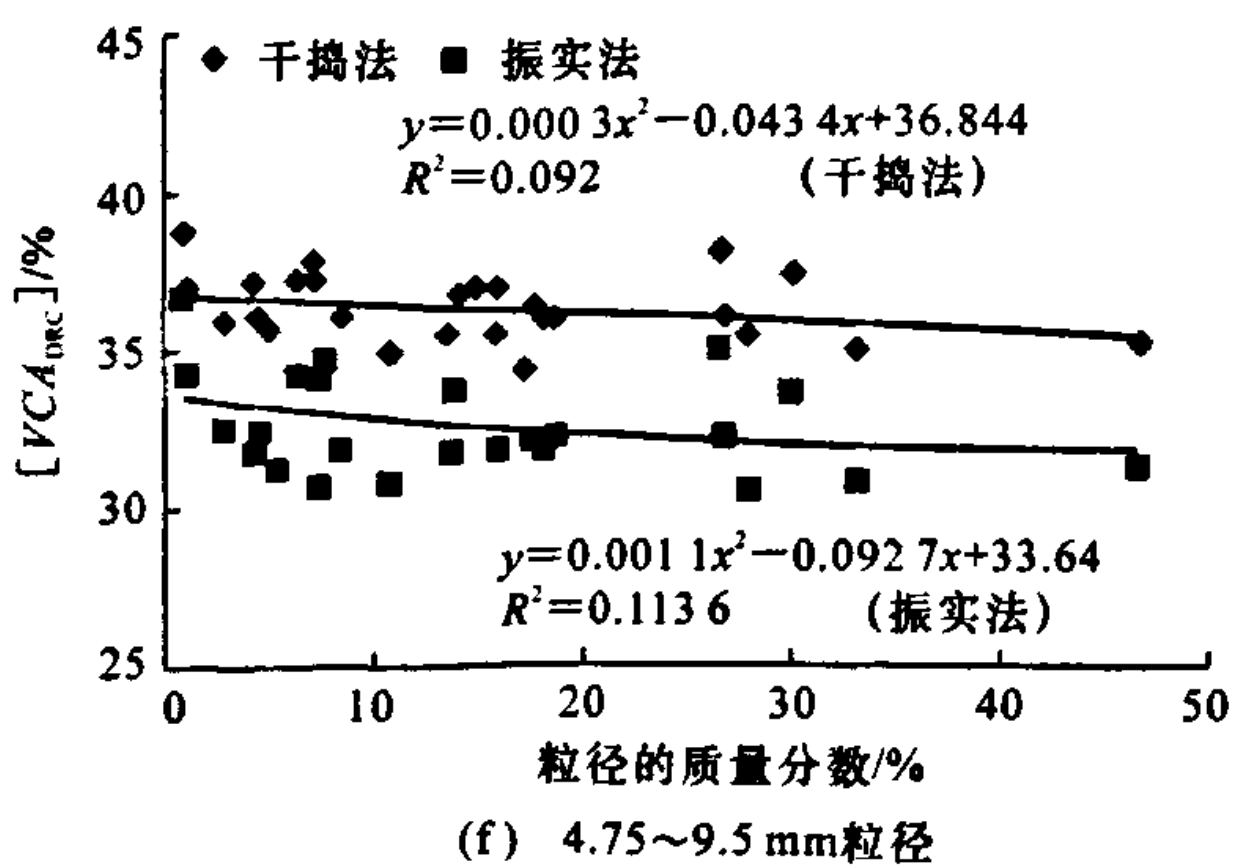
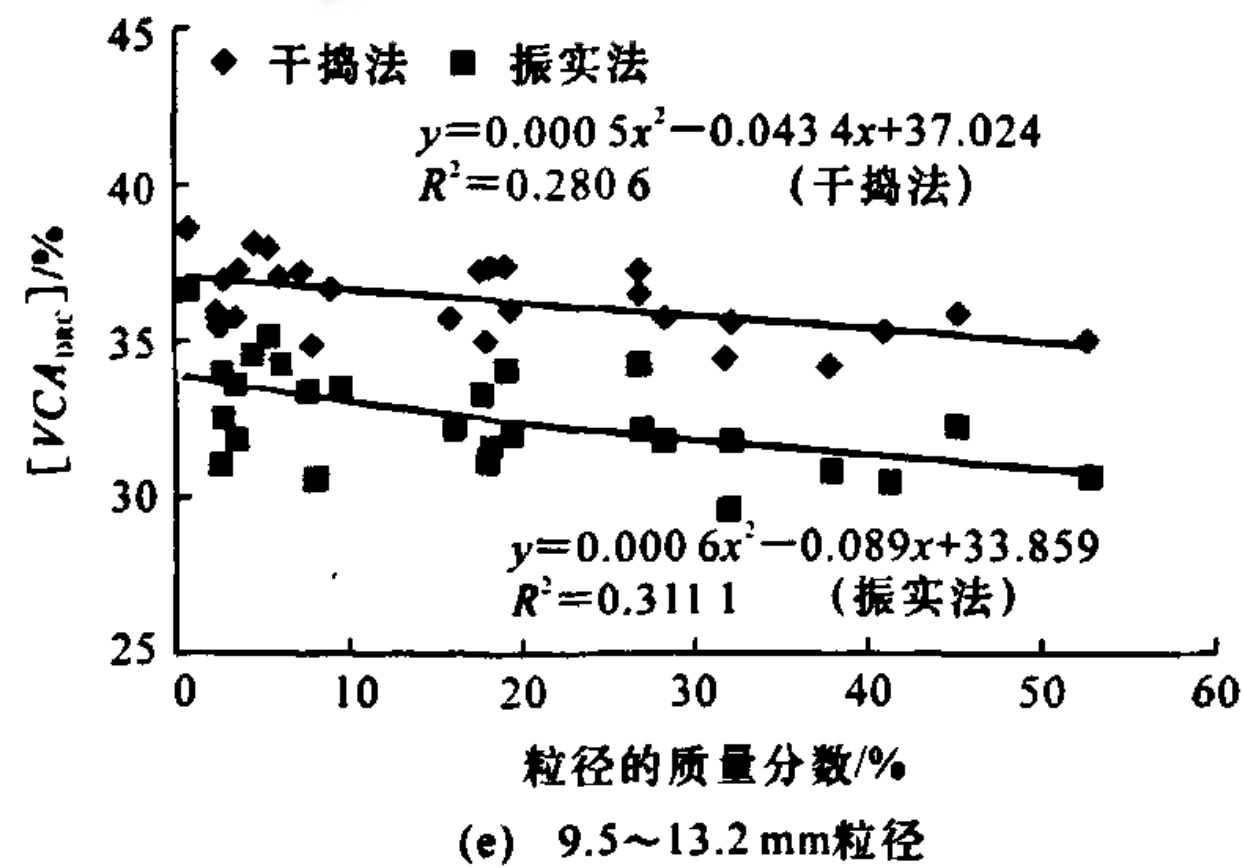
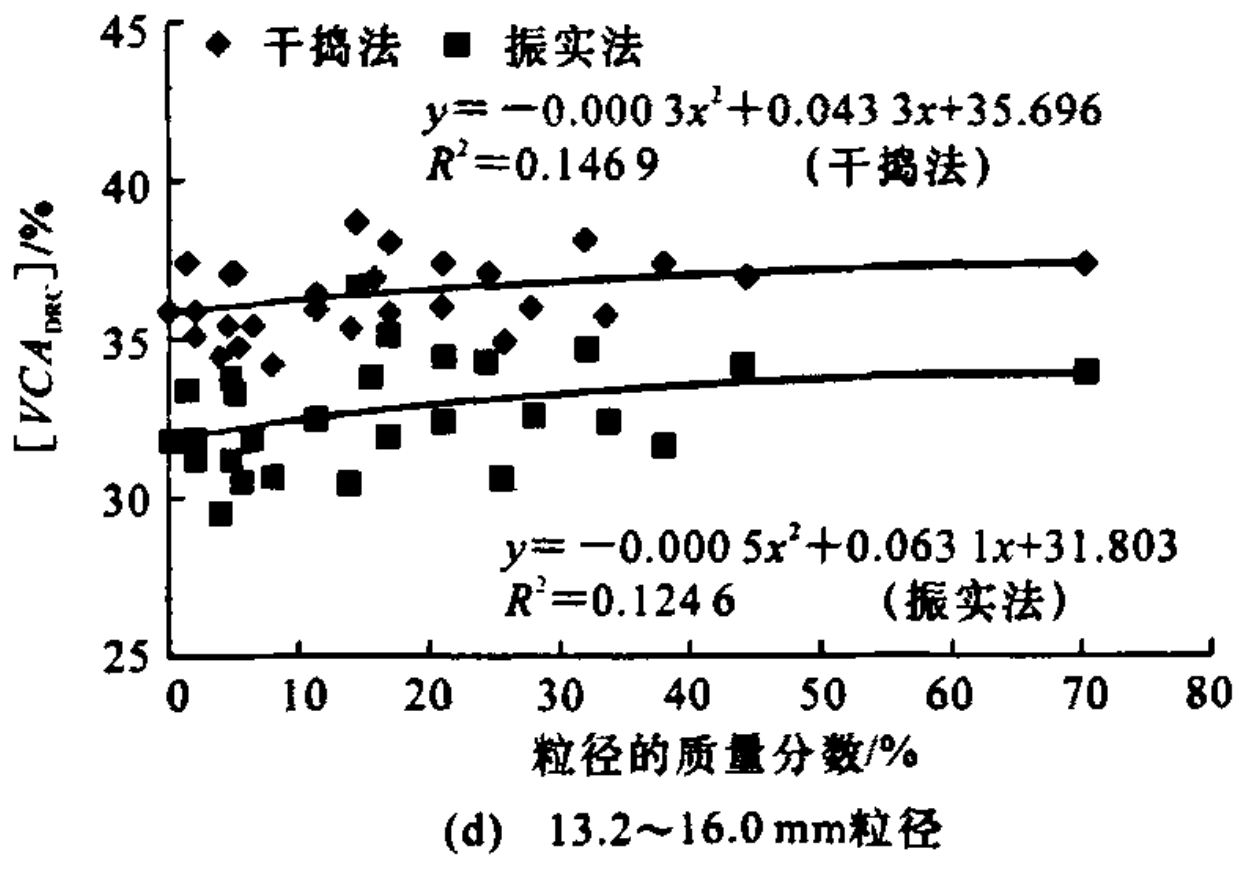
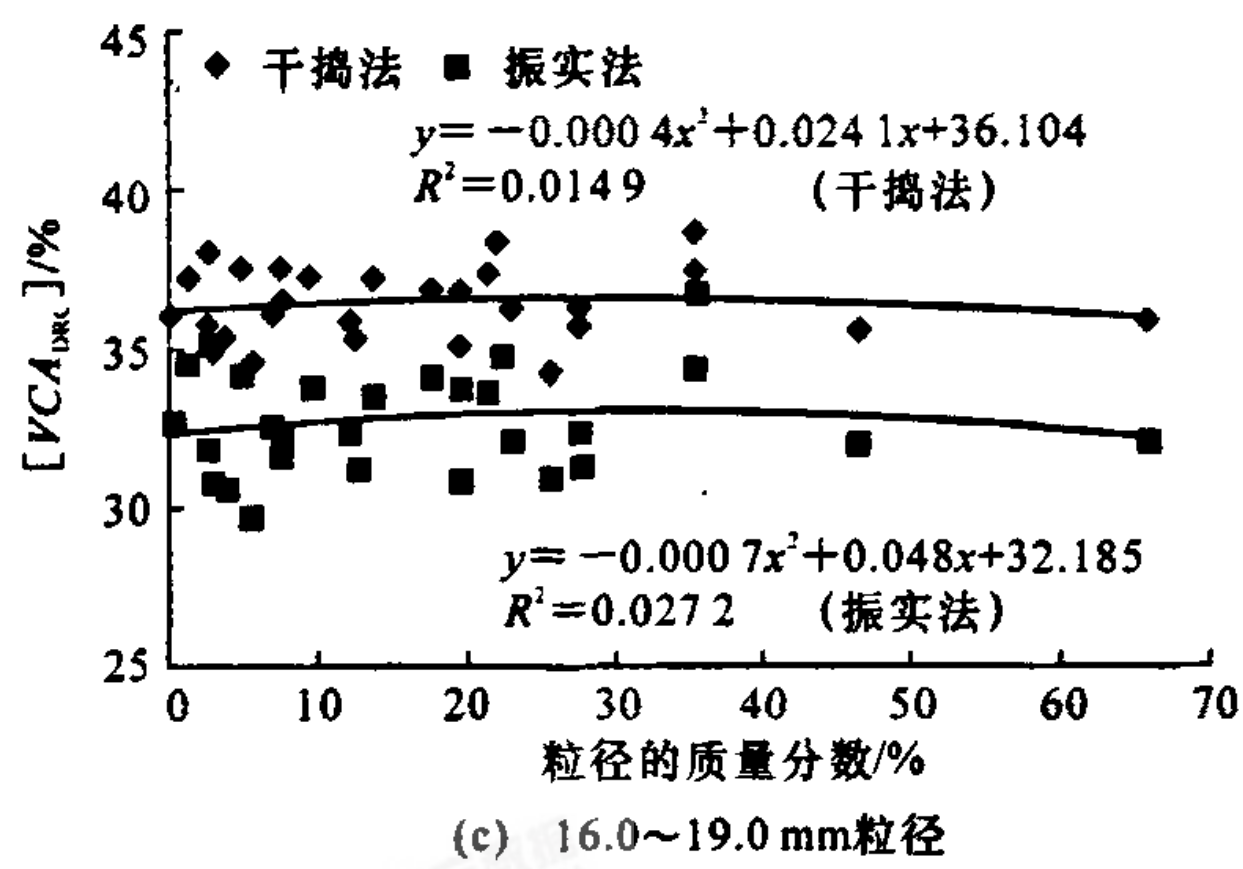
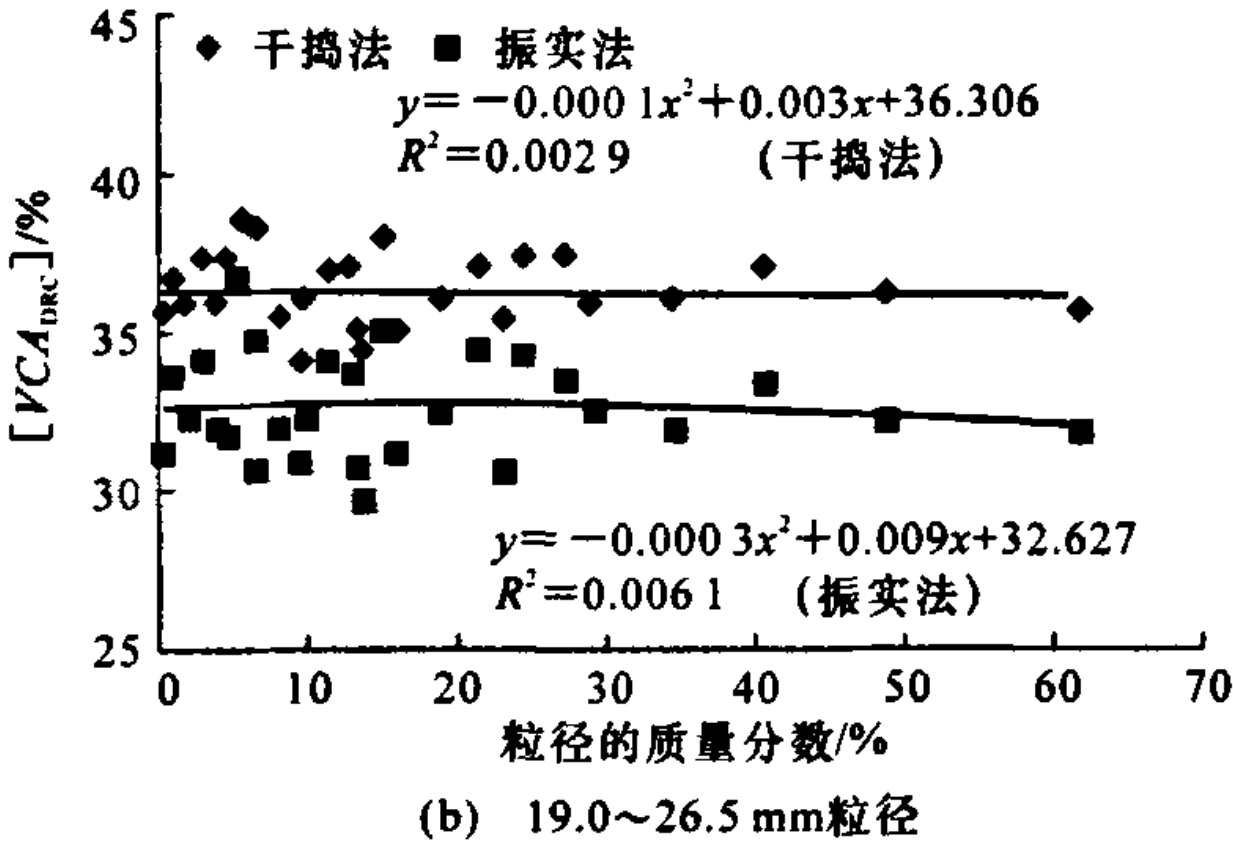
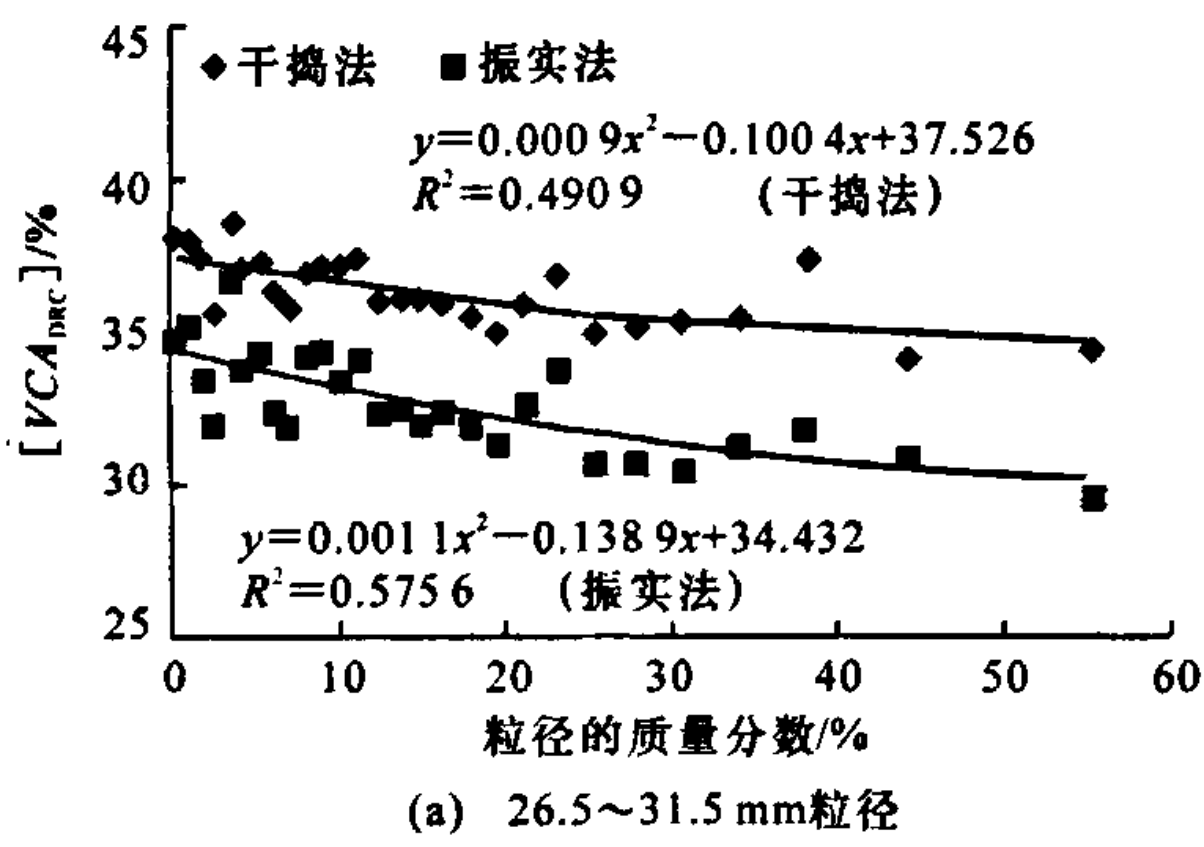


图 2 各档粗集料粒径质量分数对 $[VCA_{DRC}]$ 的影响

(3)粗集料粒径 4.75 mm、13.2 mm 的质量分数与 $[VCA_{DRC}]$ 有一定的相关性,但 R^2 只有0.113 6和0.124 6(振实法),同时 $[VCA_{DRC}]$ 随着 13.2 mm 粒径的质量分数的增加而增大。

(4)粗集料粒径 16.0 mm、19.0 mm 的质量分数与 $[VCA_{DRC}]$ 几乎不相关。

由此可知, $[VCA_{DRC}]$ 与粗集料粒径 26.5 mm、9.5 mm 的质量分数较为相关;根据 $[VCA_{DRC}]$ 最小原则,应保证粗集料中 26.5 mm 及以上的质量分数,其次是 9.5 mm 的质量分数。这与前述的泰波公式幂指数 n 取值大于 0.5 具有一致性。

3 结 语

(1)泰波公式的幂指数 n 值为 0.5~0.6 时,沥青碎石基层粗集料骨架空隙率 $[VCA_{DRC}]$ 值最小,且粗集料质量分数较高。

(2)通过均匀设计法发现,沥青碎石基层粗集料粒径 26.5 mm 的质量分数和 $[VCA_{DRC}]$ 的相关性最好, $[VCA_{DRC}]$ 随其质量分数的增加而降低;9.5 mm 的质量分数和 $[VCA_{DRC}]$ 的相关性次之, $[VCA_{DRC}]$ 也随其质量分数的增加而降低。

(3)幂指数法和均匀设计法在确定沥青碎石基层粗集料相对比例方面具有一致性。

参考文献:

References:

- [1] Williams E G. Design and construction of large stone HMA basis in Kentucky [J]. Hot Mix Asphalt Technology, 1988, (1): 37-42.
- [2] Kandhal P S. Large stone asphalt mixes: design and construction [R]. Albuquerque: National Center for Asphalt Technology, 1990.
- [3] Anderson R M, Epley L E, Walker D. Kentucky's experience with large size aggregate in bituminous hot-mix [J]. Asphalt Paving Technologists, 1991, 60 (1): 1-18.
- [4] Donald K C. Designing asphaltic concrete mixes which are more readily compacted [J]. Asphalt Paving Technologists, 1990, 59 (1): 341-359.
- [5] 解晓光, 马松林, 王哲人. 沥青混合料马歇尔击实法与振动压实法成型工艺的比较研究 [J]. 中国公路学报, 2001, 14(1): 9-12.
- XIE Xiao-guang, MA Song-lin, WANG Zhe-ren. Study of compacting properties of asphalt mixture with MARSHALL and vibratory compaction method [J]. China Journal of Highway and Transport, 2001, 14(1): 9-12.
- [6] 陆长兵, 黄晓明. 大型马歇尔试验击实次数 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2004, 24(1): 21-24.
- LU Chang-bing, HUANG Xiao-ming. Striking times of large scale Marshall compaction tests [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(1): 21-24.
- [7] 魏建国, 查旭东, 郑健龙, 等. 基于不同成型方法的沥青稳定碎石性能对比研究 [J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(2): 41-45.
- WEI Jian-guo, ZHA Xu-dong, ZHENG Jian-long, et al. Performance comparison of asphalt macadam mixture based on different molding methods [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(2): 41-45.
- [8] 解晓光, 王哲人. 沥青碎石混合料动力变形特性研究 [J]. 中国公路学报, 2006, 19(2): 24-30.
- XIE Xiao-guang, WANG Zhe-ren. Research on dynamic deformation characteristic of asphalt macadam mixture [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(2): 24-30.
- [9] 黄晓明, 车同芝, 张晓冰. 沥青稳定基层路面结构设计综述 [J]. 河南交通科技, 1999, 19(3): 3-11.
- HUANG Xiao-ming, CHE Tong-zhi, ZHANG Xiao-bing. Design of full depth asphalt pavement [J]. Science and Technology of Henan Communications, 1999, 19(3): 3-11.
- [10] 王富玉, 任立锋, 刘元烈. 大粒径沥青混合料的路用性能研究 [J]. 公路交通科技, 2003, 20(5): 6-9.
- WANG Fu-yu, REN Li-feng, LIU Yuan-lie. Study on pavement performance of LSAM [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2003, 20(5): 6-9.
- [11] 林绣贤. 柔性路面结构设计方法 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1988.
- [12] 方开泰. 均匀设计与均匀设计表 [M]. 北京: 科学出版社, 1994.