

文章编号:1671 8879(2006)01 0024-05

## 水泥稳定碎石混合料配合比的优化

周卫峰<sup>1,2</sup>, 赵 可<sup>2</sup>, 王德群<sup>2</sup>, 许克学<sup>2</sup>

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 西安 710064; 2. 天津市市政工程研究院, 天津 300074)

**摘 要:**为提高半刚性基层的抗裂能力,根据抗裂能力最佳、强度满足要求的原则,分别用静压法及振动法进行了水泥稳定碎石混合料级配和配比的优化,并对优化结果进行了对比分析。试验结果表明,现场经振动压实的水泥稳定碎石混合料强度、抗裂特性与室内振动成型的混合料特性更趋于一致,用振动法优化的级配配比可显著提高半刚性基层的抗裂能力。

**关键词:**道路工程; 水泥稳定碎石混合料; 抗裂; 强度; 配合比; 优化设计; 振动法; 静压法  
**中图分类号:**U414.1 **文献标识码:**A

### Mix Ratio Optimization Design of Cement Stabilized Macadam Based on Static Pressure Method and Vibration Method

ZHOU Wei-feng<sup>1,2</sup>, ZHAO Ke<sup>2</sup>, WANG De-qun<sup>2</sup>, XU Ke-xue<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Tianjin Municipal Engineering Research Institute, Tianjin 300074, China)

**Abstract:** In order to improve the anti-cracking performance of semi-rigid roadbase, the cement stabilized macadam's mix ratio was optimized with static pressure method and vibratory method respectively which based on the principles that anti-cracking performance is optimal and strength value meets the engineering demand. Test results indicate that it is more reasonable that using vibratory method experimental results to control construction quality, and using vibratory design method result can improve the anti-cracking performance of semi-rigid roadbase obviously. 8 tabs, 7 figs, 6 refs.

**Key words:** road engineering; cement stabilized macadam; anti-cracking; strength; mix ratio; optimal design; vibration method; static pressure method

## 0 引言

振动压实已成为高等级公路水泥稳定碎石混合料基层普遍采用的施工工艺,但室内仍采用与现场并不匹配的试验方法:用重型击实法确定最大干密度及最佳含水量,用静压法成型试件测定抗压强度及抗裂特性。由此衍生出一系列问题:重型击实法确定的最佳含水量及最大干密度作为控制施工质量

的技术指标是否合适?以静压法或振动法成型的试件其物理力学性质或许不同,那么用何种成型方式制作的试件强度控制现场质量更为有效?用静压法进行室内研究所优化的配合比(包括级配、水泥剂量等)在振动压实条件下路用性能是否最优<sup>[1-3]</sup>?为此,本文采用振动法和静压法,对水泥碎石混合料配合比进行优化设计,对优化结果进行了对比分析,并在生产施工中取得了良好的效果。

收稿日期:2005-01-09

作者简介:周卫峰(1971-),男,陕西韩城人,天津市市政工程研究院工程师,长安大学工学博士研究生。

1 静压法优化

水泥稳定碎石混合料作为基层首先应保证强度满足要求。有关资料表明<sup>[1]</sup>,提高水泥稳定碎石混合料强度手段有多种,如适当增加 0.075 mm 通过率、增加水泥用量及调整级配等,但水泥剂量过高将导致混合料抗裂能力降低<sup>[2-4]</sup>。本项研究的指导思想就是希望通过优化找出强度满足要求、抗裂能力最佳的水泥稳定碎石混合料。

1.1 0.075 mm 通过率对强度及干缩特性的影响

1.1.1 对强度的影响

安排了 3 种级配,除 0.075 mm 通过率有大的差别外,其余筛孔通过率基本相同,根据标准击实试验确定最佳含水量及最大干密度,通过静压法制作

试件测定各龄期无侧限抗压强度。级配见表 1,无侧限抗压强度试验结果见表 2。

表 1 0.075 mm 通过率不同的水泥稳定碎石级配表

筛孔直径/mm	31.50	19.00	9.50	4.75	2.36	0.60	0.075
级配 I	100.0	79.0	57.3	35.60	28.20	16.3	7.0
级配 II	100.0	79.0	56.2	36.40	29.30	15.0	3.5
级配 III	100.0	79.0	56.7	36.90	29.60	13.3	0

试验结果表明,0.075 mm 通过率下降,混合料最佳含水量及最大干密度呈下降趋势。方差分析(显著性水平 0.05)结果表明,0.075 mm 通过率对短龄期(7 d,28 d)试件强度无显著影响;对于长龄期试件则表现出 0.075 mm 通过率越大,无侧限抗压强度越高的趋势。

表 2 0.075 mm 通过率对强度影响试验结果

水泥剂量/%	级配形式	最佳含水量/%	最大干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	7 d 龄期		28 d 龄期		90 d 龄期		180 d 龄期	
				R <sub>0.95</sub> /MPa	C <sub>v</sub> /%	R <sub>0.95</sub> /MPa	C <sub>v</sub> /%	R <sub>0.95</sub> /MPa	C <sub>v</sub> /%	R <sub>0.95</sub> /MPa	C <sub>v</sub> /%
4	级配 I	6.1	2.42	3.22	4.1	5.03	8.5	7.45	9.8	8.81	4.1
	级配 II	5.3	2.41	3.67	5.1	4.89	8.0	6.73	14.1	8.13	12.1
	级配 III	5.0	2.38	3.34	5.4	5.52	8.0	6.09	11.2	7.36	4.4
5	级配 I	6.2	2.43	4.91	4.1	6.99	3.6	9.25	10.9	11.50	8.2
	级配 II	5.4	2.41	4.70	9.4	6.97	8.6	8.40	10.6	9.52	12.1
	级配 III	5.2	2.39	4.60	9.6	6.95	7.8	8.68	14.7	9.41	11.0

1.1.2 对干缩特性的影响

确定水泥剂量 5%,根据确定的最佳含水量及最大干密度,静压法制作梁式试件,养生 7 d。置于烘箱(温度控制 40℃)中使其失水,隔一定时间取出称重,并用千分尺测试件长度,可精确至 0.005 mm,计算其最大干缩应变。试验结果见表 3。

表 3 0.075 mm 通过率不同的水泥稳定碎石混合料干缩试验结果(千分尺法)

级配形式	最大干缩应变
级配 I	375.2
级配 II	321.1
级配 III	253.6

由表 3 可见,以最大干缩应变为判据,显然 0.075 mm 通过率越小,最大干缩应变越小,则混合料抗干缩能力也越强。

1.2 级配对混合料强度及干缩特性的影响

1.2.1 级配对强度的影响

资料表明<sup>[5]</sup>,相同水泥剂量下,级配良好的混合料其强度比级配不良的混合料要高得多。据此通过

调整级配提高混合料强度应有较大的潜力。研究采用两种级配,分别在不同水泥剂量下测定其 7 d 无侧限抗压强度。所用级配见表 4,强度试验结果见表 5。

表 4 级配表

筛孔直径/mm	31.50	19.00	9.50	4.75	2.36	0.60	0.075
级配 A	100.0	85.9	62.2	40.70	32.20	18.1	6.0
级配 B	100.0	68.2	44.5	26.80	20.00	9.2	0

表 5 级配 A、B 强度试验结果

级配 A	水泥剂量/%	2	3	4	5	6	7
	最佳含水量/%	4.80	5.00	5.10	5.00	5.20	5.20
	最大干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	2.376	2.384	2.383	2.374	2.382	2.383
	7 d 强度/MPa	1.32	2.07	2.91	4.30	4.79	5.37
级配 B	变异系数/%	12.70	6.27	8.21	7.78	8.05	10.97
	最佳含水量/%	—	5.00	—	5.00	5.10	5.20
	最大干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	—	2.400	—	2.399	2.400	2.394
	7 d 强度/MPa	—	2.42	—	3.98	4.59	5.62
	变异系数/%	—	7.81	—	7.71	11.66	7.07

由表 5 可以看出,两种级配在各水泥剂量下最佳含水量接近,而级配 B 的最大干密度大于级配 A。方差分析结果(显著性水平 0.05)表明,水泥剂量对强度有显著影响,而级配对强度无显著影响。

### 1.2.2 级配对干缩特性的影响

研究采用 6%、7% 的水泥剂量及级配 A、B 组合为 4 种混合料,用静压法制作梁式试件,分别用千分尺法及千分表法测其干缩应变,以比较其抗干缩能力。

(1)千分尺法。试件分别在其最佳含水量及最大干密度下制作,养生 7 d 后取出,在室温下放置 12 h,使表面水蒸发。后测其质量,测试件长度。置于室温下使其自然风干,在预定的时间用千分尺测量试件长度,计算干缩应变、干缩系数。试验结果见图 1、图 2。

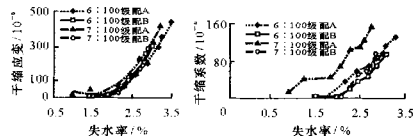


图 1 干缩应变与失水率关系

图 2 干缩系数与失水率关系

随着水分的散失,水泥稳定碎石混合料干缩应变逐渐增大。级配相同,水泥掺量 7% 的级配 A、B 混合料干缩系数平均分别为 6% 掺量的 1.8 和 1.4 倍;水泥剂量相同,7%、6% 水泥掺量的级配 A 混合料干缩系数平均为级配 B 混合料的 2.1 倍和 1.6 倍。综合考虑干缩应变和干缩系数得出结论:水泥剂量增加,混合料抗干缩能力下降;级配 B 混合料抗干缩能力优于级配 A 混合料抗干缩能力。4 种混合料尤以 6% 水泥掺量的级配 B 混合料抗干缩能力最优。

(2)千分表法。研究中尝试用千分表来测量水泥稳定碎石混合料试件干缩能力,具体试验方法为:按最佳含水量及最大干密度,采用静压法制作梁式试件,养生 7 d 后取出置于室温下风干 12 h,以排除对干缩并不产生作用的表面水份;之后,取失水前后千分表的读数差及试件的质量差,计算干缩应变及失水量,直到测试时间累计达到 600 h 以上;试验结果见图 3、图 4。

与用千分尺法得到的结论相同,即水泥剂量增加将使混合料抗干缩能力变差,而级配 B 混合料抗干缩能力优于级配 A 混合料。试验结果同时表明,较低水泥掺量及级配 B 组成的混合料抗干缩能力最优。

由对静压法试件进行的强度及干缩特性的研究结果得出结论:①在所研究范围内,0.075 mm 通过

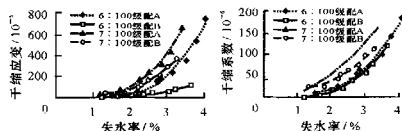


图 3 干缩应变与失水率关系

图 4 干缩系数与失水率关系

率对强度有影响,表现为 0.075 mm 通过率增加,龄期试件强度增大,但 0.075 mm 通过率大,混合料抗裂能力下降。②水泥剂量对强度影响显著,要提高强度,增加水泥剂量是最有效的措施。研究表明,水泥剂量增加 1%,混合料强度提高 56%。但水泥剂量增加也意味着抗裂性能的下降,特别是对于级配 A,水泥剂量的增加将严重降低混合料抗裂能力。③级配对强度无显著影响,但级配 B 抗裂能力明显优于级配 A。所以应依据强度满足要求、抗裂性能最佳的原则进行水泥稳定碎石混合料配合比设计。

由以上分析,静压法提出的最优配合比为:级配采用级配 B,0.075 mm 通过率为 0,综合考虑抗裂特性和强度,水泥剂量为 5%~6%。

## 2 振动法优化

振动法确定水泥碎石混合料最佳含水量、最大干密度及成型试件方法见文献[6]。振动频率 30 Hz,偏心块夹角 30°,激振力 7 612 N,静面压力 140 kPa,振幅 1.4 mm,振动总时间 2 min。

### 2.1 级配对混合料强度及干缩特性的影响

#### 2.1.1 对强度的影响

研究选用级配 A、B,用振动法确定最佳含水量及最大干密度,对成型试件测无侧限抗压强度。试验结果与静压法比较(表 6),结果表明:

(1)级配 B 最佳含水量小于级配 A 最佳含水量,级配 B 最大干密度大于级配 A 最大干密度(平均增大 1.35%),相同水泥掺量时,级配 B 混合料强度明显高于级配 A 混合料(平均提高 25%)。方差分析结果表明(显著性水平 0.05),振动条件下,级配对强度有显著影响。

(2)与静压法相比,振动法所确定的最佳含水量、最大干密度均增加,无侧限抗压强度大幅度提高,试件强度变异系数降低。

#### 2.1.2 对干缩特性的影响

振动成型抗压强度试件(水泥掺量 5%),用千分表法测试试件干缩应变,同时与成型同级配和水泥剂量下的静压法强度试件相比较。试验结果见图 5、图 6。

表 6 振动成型水泥稳定碎石混合料强度试验结果

水泥剂量/%		3		4		5		6	
项目		振动法	与静压法比值	振动法	与静压法比值	振动法	与静压法比值	振动法	与静压法比值
级配 A	最佳含水量/%	5.60	1.12	5.70	1.12	5.70	1.14	5.80	1.12
	最大干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	2.438	1.020	2.438	1.020	2.432	1.020	2.435	1.020
	7 d 强度/MPa	4.90	2.37	6.07	2.09	7.08	1.65	8.88	1.85
	变异系数/%	8.58	1.37	7.93	0.97	3.42	0.44	5.27	0.65
级配 B	最佳含水量/%	5.40	1.08	5.40	—	5.50	1.10	5.50	1.08
	最大干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	2.470	1.030	2.470	—	2.470	1.030	2.464	1.030
	7 d 强度/MPa	6.51	2.69	7.73	—	9.04	2.27	10.08	2.20
	变异系数/%	6.83	0.87	6.62	—	5.56	0.72	5.56	0.48

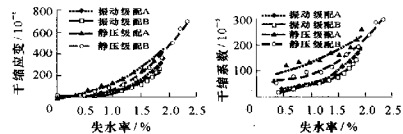


图 5 干缩应变与失水率关系 图 6 干缩系数与失水率关系

试验结果表明,相同失水率下,级配 A、B 的振动成型试件干缩应变及干缩系数均小于静压成型试件的干缩应变及干缩系数,这表明振动成型的混合料抗干缩能力优于静压成型混合料的抗干缩能力。而振动条件下级配 B 混合料抗干缩能力最佳(振动成型下,级配 A 混合料干缩应变及干缩系数最大,分别为级配 B 混合料的 1.2 倍和 1.25 倍)。

2.2 优化水泥稳定碎石混合料配合比结果

由振动法研究成果得出结论:①在所研究范围内,级配及水泥剂量对强度均有显著影响,即水泥剂量相同时级配 B 无侧限抗压强度大于级配 A。水泥剂量增加,强度增加;②相同水泥剂量下,振动成型试件抗干缩能力优于静压成型试件抗干缩能力,且以级配 B 抗干缩能力最优;③综合分析振动法强度及干缩试验结果,最优级配为级配 B,优化水泥剂量为 3.5%~4.5%。

研究结果表明,采用振动法优化的水泥稳定碎石混合料可达到强度及抗裂能力同时增加的最优效果。只要级配合理,没有必要通过增加水泥用量,牺牲一部分抗裂能力来换取强度的合格。用振动法优化的水泥稳定碎石混合料达到了抗裂能力最佳、水泥剂量少、强度合格及工程造价降低的最佳效果。

3 试验工程

3.1 试验段实际施工级配表

由于目前高速公路基层施工中普遍使用振动压

路机,因此试验工程水泥稳定碎石混合料配比根据振动法优化结果提出,水泥用量 3.5%~5%。研究中铺筑了 4 个试验段,试验工程级配范围见表 7。

表 7 试验工程级配表

筛孔直径/mm	31.50	19.00	9.50	4.75	2.36	0.60	0.075
试验段 1	97.8	73.8	65.8	30.50	11.6	5.2	0.9
试验段 2	100.0	79.6	53.4	27.20	20.6	10.8	3.0
试验段 3	100.0	80.8	56.6	32.10	29.1	11.8	1.9
试验段 4	100.0	77.1	46.0	34.50	19.0	10.1	0.2

3.2 试验段施工情况

试验段所用混合料均由拌和厂生产,汽车运输至现场,使用摊铺机摊铺。碾压工艺为:钢轮压路机来回静压一遍,然后振动压路机来回振动压实两遍,最后胶轮压路机洒水碾压一遍。土工布覆盖,洒水养生 7 d。

3.3 试验段施工后检测

各试验段施工后检测情况见表 8。

30 d 后的调查结果表明,试验段均无裂缝。而与试验段 1 相接的生产段采用级配 A,水泥用量与试验段相同,调查发现 600 m 之内有 5 条裂缝。

由表 8 可看到,所有现场芯样平均抗压强度均大于现场取样、室内静压制作试件的抗压强度,而接近于现场取料、振动成型试件的抗压强度。这充分说明用静压法试件强度控制混合料质量要求过高,直接后果是水泥剂量太高、振动压实后混合料强度过大,在投资增加的情况下反而使混合料抗裂能力下降。

3.4 含水量与压实度的关系

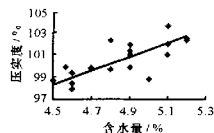
根据试验段 4 的级配,按照水泥剂量 3.5%~4% 的配比铺筑了 5 km 的生产段。标准击实确定的最佳含水量 5.4%,最大干密度 2.388 (g·cm<sup>-3</sup>),但现场检测表明,标准击实法确定的最大干密度用于控制现场压实度是失效的。在含水量适宜的前提下,

表 8 试验段施工后检测结果

项目	水泥剂量/%	击实法最大干密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	击实法最佳含水量/%	现场含水量检测/%	现场取料室内静压 7 d 强度/MPa	现场取料室内振动 7 d 强度/MPa	芯样平均强度		芯样平均压实度/%
							强度/MPa	变异系数/%	
试验段 1	5	2.390	5.2	4.7	3.37	7.89	8.11(3)	2.2	96.7
试验段 2	5	2.381	5.2	4.6	3.48	6.70	4.52(3)	15.0	96.2
试验段 3	5	2.390	5.2	4.6	3.85	7.20	7.88(3)	10.0	97.5
试验段 4	4	2.388	5.4	4.4	2.45	3.28	2.98(3)	18.0	94.6

注:表中括号中的数字为试件个数。

现场只需静压一遍、振动压实一遍、胶轮压一遍便能够达到压实度要求,且大部分压实度超过 100%。此碾压工艺实际比试验段少振动压实一遍。现场检测含水量与压实度关系见图 7。



由图 7 可见,当含水量大于等于 4.9% 时,混合料压实度除一个点外均超过 100%。一方面说明标准击实法确定的

最大干密度太小,在振动作用下现场很容易达到,但此时混合料未必有好的路用性能(由于没有充分压实,强度低,抗裂性能差,水泥剂量大)。因此建议采用级配 B 时,用振动击实结果作为现场压实度控制指标。另一方面说明现场含水量控制的重要性,含水量小,混合料除不容易压实外,水泥浆在振动作用下由于含水量小难以运动,不能有效填充混合料空隙,致使混合料强度低,抗裂能力下降。

## 4 结 语

(1) 静压法优化水泥稳定碎石混合料配合比未能表示出强度及抗裂性能同时增加,因此不得不通过增加水泥用量,牺牲一部分抗裂性能来换取强度的合格,但实际工程表明,这是没有必要的,这只能导致振动压实下现场混合料强度过高,抗裂性能下降。而用振动法优化的级配及配合比达到了增加强度、抗裂性能最佳、水泥含量减少及工程造价降低的最佳效果。

(2) 实际工程表明,级配 B 水泥稳定碎石混合料采用标准击实确定的最大干密度过小,用于控制现场压实是失效的,因此建议采用振动击实结果作为现场压实度控制指标。

(3) 试验工程检测结果表明,现场 7 d 龄期芯样抗压强均高于室内静压法成型试件的抗压强度,而与室内振动法制作的试件抗压强度相当。

(4) 据振动法提出的水泥稳定碎石混合料级配及

配比是可行的,已在生产施工中取得了良好效果。

## 参考文献:

### References:

- [1] 陈拴发,郑木莲,王秉纲. 粉煤灰混凝土应力腐蚀特性试验研究[J]. 中国公路学报, 2005, 18(3): 14~17.  
CHEN Shuan-fa, ZHENG Mu-lian, WANG Bing-gang. Experimental Research on Stress Corrosion Character of Fly-ash-cement Concrete[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(3): 14~17.
- [2] 张嘎吱. 考虑抗裂性能的水泥稳定材料配合比设计方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2001.  
ZHANG Ga-zhi. Study on the Design Method of Ratio of Mixture for Cement Stabilized Aggregates Based on the Anti-cracking Performance[D]. Xi'an: Chang'an University, 2001.
- [3] 蒋应军, 陈忠达, 彭 波, 等. 密实骨架结构水泥稳定碎石路面配合比设计方法及抗裂性能[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2002, 22(4): 9~12.  
JIANG Ying-jun, CHEN Zhong-da, PENG Bo, et al. Mixture Design Method and Anti-cracking Performance of Cement Stabilizing Crashed Rock Pavement with Dense Skeleton Type[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2002, 22(4): 9~12.
- [4] 景宏君, 张 斌. 黄土路基强度规律[J]. 交通运输工程学报, 2004, 4(2): 14~18.  
JING Hong-jun, ZHANG Bin. Loess Subgrade Strength[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004, 4(2): 14~18.
- [5] 梅传江, 牛 朋. 水泥稳定碎石基层路用性能研究[J]. 公路交通科技, 2002, 19(3): 35~37.  
MEI Chuan-jiang, NIU Peng. Study on Performance of Cement Stabilized Macadam Base[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2002, 19(3): 35~37.
- [6] 李美江. 道路材料振动压实特性研究[D]. 西安: 长安大学, 2002.  
LI Mei-jiang. Study on Compacting Performance of Road Material[D]. Xi'an: Chang'an University, 2002.