

# 水泥稳定级配碎石最大干密度影响因素研究

周永军

(四川交投建设工程股份有限公司, 四川 成都 610047)

**摘要:** 最大干密度是水泥稳定级配碎石施工过程中的重要质量控制参数, 直接决定基层压实度的大小, 而压实度是反映基层内在质量的关键指标。文中研究了材料密度、含水率、混合料级配对水泥稳定级配碎石最大干密度的影响, 为提高水泥稳定碎石基层施工质量提供依据。

**关键词:** 公路; 基层; 水泥稳定级配碎石; 最大干密度

中图分类号: U416.216

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2017)01-0079-04

底基层、基层是路面抵抗车辆荷载作用的主要承重层, 其施工质量对路面使用寿命及服务水平起决定作用。为了满足高速公路重交通的使用要求, 路面底基层、基层需具有抗压强度高、整体稳定性好、抗疲劳能力强的特性。实践证明, 用水泥稳定级配碎石、二灰碎石铺筑的路面基层、底基层具备这些优点, 故其成为中国高速公路路面工程中理想的基层、底基层材料。最大干密度是水泥稳定级配碎石、二灰碎石施工中的重要质量控制参数, 直接决定基层压实度大小, 是反映基层内在质量的重要技术指标。若基层压实度不够, 会导致基层的抗压能力不足, 主要表现为基层开裂, 裂缝反射到沥青面层上, 导致沥青路面开裂, 大大降低路面的使用性能。该文以遂广(遂宁—广安)高速公路工程为依托, 通过室内试验、现场施工检测, 研究材料密度、含水率、混合料级配对水泥稳定级配碎石最大干密度的影响。

## 1 原材料及混合料组成设计

遂广高速公路基层集料采用涪江 5 cm 以上卵石, 经颚破、反击破和冲击破后, 依次通过 28、22、16、11、6、3 mm 振动筛筛分而成。碎石采用遂宁涪江卵石, 分 19~26.5、13.2~19、9.5~13.2、4.75~9.5、2.36~4.75 和 0~2.36 mm 6 种规格, 均水洗, 其中 0~2.36 mm 为机制砂。水泥均采用四川蓬溪青山水泥建材有限公司生产的缓凝 P.C32.5 水泥。各级碎石经筛分后的级配见表 1。

根据各级集料筛分结果, 参照相关规范及施工经验, 确定基层材料的比例为 19~26.5 mm : 13.2~19 mm : 9.5~13.2 mm : 4.75~9.5 mm : 2.36~4.75 mm : 0~2.36 mm = 18 : 18 : 13 : 14 : 11 : 26, 合成级配见表 2 及图 1。

表 1 各级集料筛分级配

筛孔尺寸/mm	不同规格碎石的通过率/%					
	19~	13.2~	9.5~	4.75~	2.36~	0~
	26.5	19	13.2	9.5	4.75	2.36
26.500	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
19.000	9.0	90.6	100.0	100.0	100.0	100.0
9.500	0.1	0.1	12.1	96.0	100.0	100.0
4.750	0.1	0.1	0.3	0.7	64.0	100.0
2.360	0.1	0.1	0.2	0.2	2.6	83.5
0.600	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	46.6
0.075	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	7.6

表 2 集料合成级配设计

级配类型	各筛孔(mm)的通过率/%						
	26.5	19	9.5	4.75	2.36	0.6	0.075
合成级配	100	81.9	52.0	33.2	22.1	12.2	2.1
上限	100	89.0	57.0	39.0	27.0	15.0	3.0
下限	90	72.0	47.0	29.0	17.0	8.0	0.0
规范中值	95	80.5	52.0	34.0	22.0	11.5	1.5

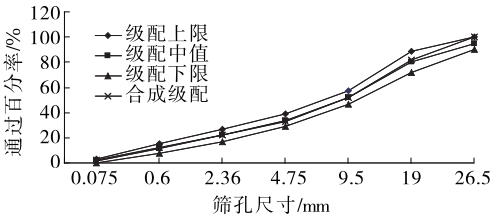


图 1 混合料级配组成曲线

## 2 最大干密度的确定

采用上述级配碎石, 按照《公路工程无机结合料

稳定材料试验规程》制备样品,掺入水泥,采用振动成型方法成型试件进行室内试验。初定水泥剂量分别为 2.8%、3.2%、3.5%(外掺),水的掺量为 3.5%、

4.0%、4.5%、5.0%、5.5%。图 2~4 为 3 种水泥剂量下两组平行试验含水率与干密度曲线,表 3 为 3 种水泥剂量下的最佳含水率及最大干密度。

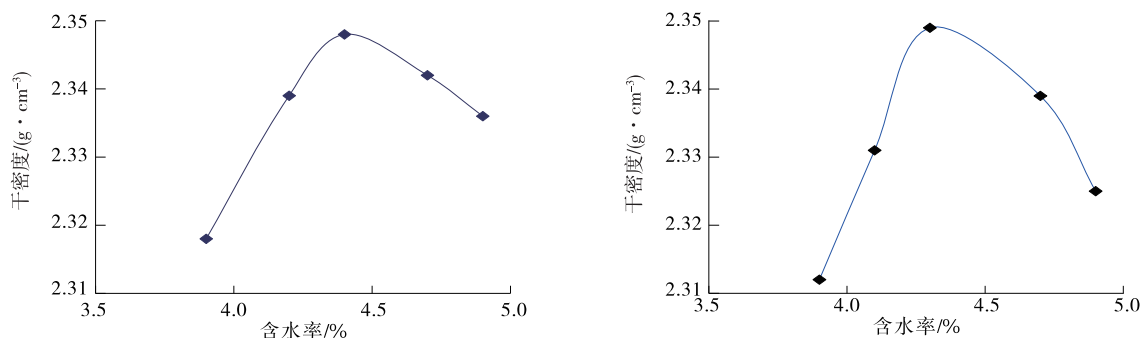


图 2 水泥剂量为 2.8% 时两组平行试验含水率与干密度曲线

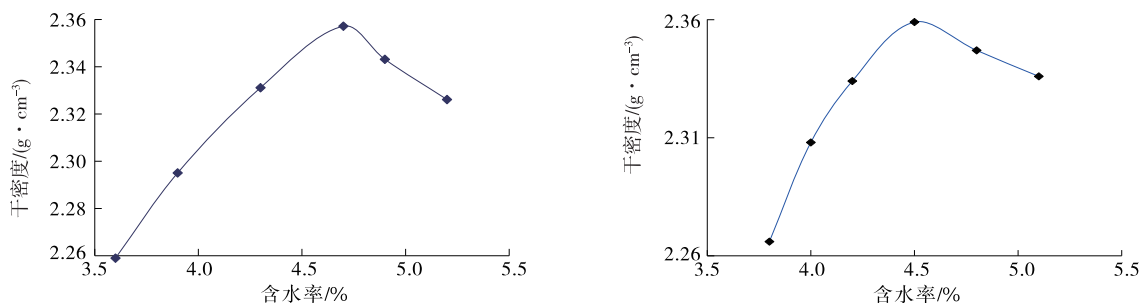


图 3 水泥剂量为 3.2% 时两组平行试验含水率与干密度曲线

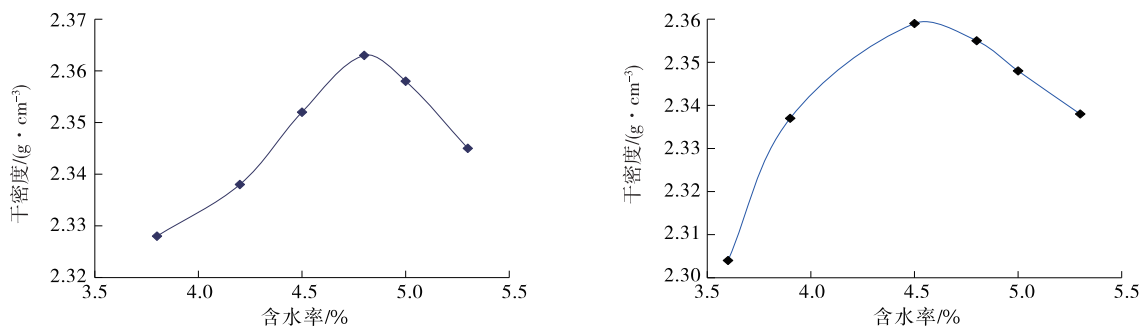


图 4 水泥剂量为 3.5% 时两组平行试验含水率与干密度曲线

表 3 不同水泥剂量下的最佳含水率及最大干密度

水泥剂量/%	最佳含水率/%			最大干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )		
	第一组平行试验	第二组平行试验	平均值	第一组平行试验	第二组平行试验	平均值
2.8	4.4	4.3	4.4	2.352	2.349	2.351
3.2	4.7	4.5	4.6	2.357	2.359	2.358
3.5	4.8	4.5	4.7	2.363	2.359	2.361

从表 3 可看出:随着水泥剂量的增大,最佳含水率增大,混合料的最大干密度也增大,三者表现出良好的相关性。在往水泥碎石混合料中加水时,一部

分水用来参加水化反应,一部分作为各颗粒之间的润滑剂,同时在操作过程中蒸发损失部分水,故随水泥剂量增加,最佳含水率增大。水泥的比重大,同时

水泥作为填料填入混合料缝隙,成型试件的空隙减小,密度增大。

为了研究现场施工工艺对成型后水泥稳定级配碎石混合料最大干密度的影响,并验证现场最大干密度与室内结果是否一致,采用室内设计的混合料及试验确定的最佳含水率(施工时,水泥剂量采用 3.2%,含水率比最佳含水率大 0.5%~1.0%)铺筑试验段。对试验路的混合料级配、水泥剂量及最大干密度进行检测,结果见表 4、表 5。

表 4 试验段实测混合料级配

筛孔/ mm	设定通 过率/%	实测通 过率/%	筛孔/ mm	设定通 过率/%	实测通 过率/%
26.50	100.0	100.0	2.360	22.1	22.4
19.00	81.9	77.1	0.600	12.2	13.9
9.50	52.0	49.7	0.075	2.1	2.8
4.75	33.2	33.7			

表 5 试验段碾压遍数与干密度

振动碾压 遍数/遍	实测干密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	振动碾压 遍数/遍	实测干密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )
3	2.316	6	2.351
4	2.331	7	2.345
5	2.363		

经检测,3 次取样采用 EDTA 滴定法进行滴定试验,获得混合料的灰剂量分别为 3.3%、3.1%和 3.1%,与设计水泥剂量基本一致。

由表 5 可知:开始阶段,水泥稳定级配碎石混合料干密度随振动碾压遍数的增加而变大,在第 5 遍后达到最大值,继续碾压,则干密度下降。据此确定该试验段的最大干密度为 2.363 g/cm<sup>3</sup>,最佳含水率为 4.6%。

综上所述,试验段混合料的级配、灰剂量和室内振动压实试验结果基本一致,但干密度相差很大,究其原因,主要是现场碾压功超过室内振动压实试验所用压实功。为了切实控制现场施工质量,采用试验段的最大干密度作为该合同段底基层施工的压实控制标准。

3 最大干密度的影响因素

通过对遂广高速公路施工现场及室内试验数据的分析,主要从材料密度、含水率、混合料级配等方面分析最大干密度的影响因素。

3.1 材料密度对干密度的影响

水泥稳定级配碎石由碎石和水泥、水组合而成,其干密度大小取决于材料的密度和组成比例。采用甲、乙两种碎石材料,设计同样的级配,并使用同一水泥进行试验,试验结果见表 6。

表 6 甲、乙两种集料最大干密度对比

集料 类别	粒径/mm	组成比 例/%	表观相 对密度	毛体积相 对密度	不同水泥剂量(%)下 的最佳含水率/%			不同水泥剂量(%)下 的最大干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )		
					2.8	3.2	3.5	2.8	3.2	3.5
甲类	19~26.5	18	2.662	2.628						
	13.2~19	18	2.668	2.621						
	9.5~13.2	13	2.646	2.624						
	4.75~9.5	14	2.667	2.621	4.4	4.6	4.7	2.351	2.358	2.361
	2.36~4.75	11	2.662	—						
	0~2.36	26	2.665	—						
乙类	19~26.5	18	2.724	2.700						
	13.2~19	18	2.724	2.699						
	9.5~13.2	13	2.724	2.692						
	4.75~9.5	14	2.725	—	4.3	4.3	4.4	2.416	2.427	2.434
	2.36~4.75	11	2.696	—						
	0~2.36	26	—	—						

由表 6 可知:在相同结合料剂量条件下,甲类碎石混合料的密度普遍低于乙类碎石混合料,乙类混合料的最大干密度大于甲类混合料。说明混合料材料密度越大、比例越高,其干密度越大。

### 3.2 混合料含水率对干密度的影响

为获得水泥混合料含水率对其干密度的影响,对不同水泥剂量下的混合料采用振动成型法进行试验,对含水率与干密度进行统计,结果见表 7。

表 7 不同水泥剂量混合料含水率与干密度的关系

水泥剂量/%	项目	第一组平行试验结果						第二组平行试验结果					
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
2.8	干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	2.318	2.339	2.348	2.342	2.336	—	2.312	2.331	2.349	2.339	2.325	—
	含水率/%	3.9	4.2	4.4	4.7	4.9	—	3.9	4.1	4.3	4.7	4.9	—
	最大干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	2.352						2.349					
	最佳含水率/%	4.4						4.3					
3.2	干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	2.259	2.295	2.331	2.357	2.343	3.326	2.266	2.308	2.334	2.359	2.347	2.336
	含水率/%	3.6	3.9	4.3	4.7	4.9	5.2	3.8	4.0	4.2	4.5	4.8	5.1
	最大干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	2.357						2.359					
	最佳含水率/%	4.7						4.5					
3.5	干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	2.328	2.338	2.352	2.363	2.358	2.345	2.304	2.337	2.359	2.355	2.348	2.338
	含水率/%	3.8	4.2	4.5	4.8	5.0	5.3	3.6	3.9	4.5	4.8	5.0	5.3
	最大干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	2.363						2.359					
	最佳含水率/%	4.8						4.5					

从表 7 可以看出:当水泥混合料的含水率未达到最佳含水率时,干密度随着含水率的增大而增加,但当水泥混合料的含水率达到最佳含水率后,随着混合料含水率的增加,干密度有所降低。从机理上分析,碎石的填充效果需通过压路机的碾压来实现,在碾压过程中,合理的含水率可对石料外表面起到较好的润湿作用,便于现场压实;若含水率较大,碾压石料时会产生相对滑移,压实效果会降低,如施工过程中出现“弹簧”现象。因此,为得到水泥混合料最大干密度和最佳压实效果,应在最佳含水率下进行压实。

### 3.3 混合料级配对最大干密度的影响

从室内试验和现场检测数据来看,混合料级配对干密度的影响较明显。根据级配理论,可将水泥稳定级配碎石密实的原理解释为大料之间的空隙用小料填充、小料之间的空隙用更小的料填充,碎石级配合理时其填充较密实,干密度变大。室内试验及现场检测表明 2.36~4.75 mm 碎石、小于 0.075 mm 颗粒(粉尘)的含量对水泥稳定级配碎石干密度的影响比其他各级料更为显著。当合成级配中 2.36~4.75 mm 碎石含量较小时,碎石的嵌挤效果明显增

强,干密度随之增大。在该项目施工中,在水泥稳定级配碎石合成级配中 2.36~4.75 mm 的碎石只有 8%左右,其干密度达到 2.382 g/cm<sup>3</sup>,施工质量也明显增强,骨架作用提高,强度增大。小于 0.075 mm 颗粒(粉尘)含量增大,粉尘的填充效果增强,干密度也会增大。而水泥稳定级配碎石合成级配中 2.36~4.75mm 的集料超过 12%时,成型后的混合料干密度明显下降,如 2.36~4.75mm 含量为 14%的混合料对应的干密度为 2.347 g/cm<sup>3</sup>。

## 4 结论

(1) 碎石材料的密度越大,成型后混合料的最大干密度越大。

(2) 当混合料处于最佳含水率时,其干密度为最大干密度,施工时应严格控制含水率。

(3) 混合料的级配越接近骨架密实型级配,合成级配中减少 2.36~4.75 mm 集料的含量,所得干密度越大,基层压实度越大。

(4) 现场施工时存在最合理的碾压遍数,此时混合料的干密度最大,其值大于室内试验所得最大

(下转第 87 页)

定一个确切时间以便于试验操作。

### 3 结论和建议

(1) T0330—2005 在试验准备部分没有考虑 0.075 mm 以下细集料对试验结果的影响,而重现性试验结果表明 0.075 mm 以下细集料对 T0330—2005 测试结果有显著影响。为了减小试验变异性,提高测量精度,建议对 0.075 mm 筛底部分进行独立试验。

(2) 为对 0.075 mm 筛底部分进行单独测试,需将其从细集料样本中干筛或水洗分离出来,规程应规定一种分离 0.075 mm 部分的方法。

(3) 浸泡类型可依照 T0330—2005 注入洁净水,使水面高出试样表面 20 mm 左右,即完全浸泡是合理的。

(4) 浸泡时间依照 T0330—2005 规定静置 24 h 即可,减少静置时间对试验结果有显著影响。

(5) 进行锥形试验时可依照现行规程采用一次性击实 25 下,以使锥模中的材料受到相同的击实功,即现行规程中规定的击实方法是合理的。

(6) 为了消除空气气泡,通过外部机械转动及振动可使集料颗粒更接近真空状态,但无论是机械转动还是手动转动,规程应明确试验过程中转动方法需保持一致。

(7) 冷却时间可依照现行规程在干燥器内冷却至室温,但规程并未给定明确的时间要求,建议规定一个冷却时间。

#### 参考文献:

- [1] 姜鹏,仰建岗,杨香黄.细集料毛体积相对密度的测定[J].公路交通科技:应用技术版,2010(5).
- [2] JTG E20—2011,公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].
- [3] JTG E42—2005,公路工程集料试验规程[S].
- [4] 韩海峰,吕伟民.细集料棱角性对沥青混合料性能的影响[J].公路工程,2013,38(6).

(上接第 82 页)

干密度。

#### 参考文献:

- [1] JTG E42—2005,公路工程集料试验规程[S].
- [2] JTG E51—2009,公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S].
- [3] 唐建亚.水泥稳定碎石基层压实度影响因素的试验研

究[J].同济大学学报:自然科学版,2002,30(3).

- [5] 杜艳廷,董进秋,刘淑艳,等.内摩擦角对细集料特性的影响研究[J].公路,2013(5).
- [6] Douglas C Montgomery.实验设计与分析[M].傅珏生,张健,王振羽,等译.北京:人民邮电出版社,2009.
- [7] Mullen W G. Weight, density, absorption and surface moisture; significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials[R].ASTM,1978.
- [8] Krugler P E, M Tahmoressi, D A Rand. Improving the precision of test methods used in VMA determination [J]. Asphalt Paving Technology, 1992, 61.
- [9] Lee D Y, P S Kandhal. An evaluation of the bulk specific gravity for granular materials[R]. National Research Council, 1970.
- [10] Prowell B D, Baker N, Brown E R. Development of a new test procedure for determining the bulk specific gravity of fine aggregate using automated methods [R]. National Center for Asphalt Technology, 2002.
- [11] Stephen A Cross. Evaluation of test equipment for determination of fine aggregate specific gravity and absorption[A]. 85th Annual Meeting of the Transportation Research Board[C]. 2006.
- [12] Nam H Tran, Randy C West. Improved test methods for specific gravity and absorption of coarse and fine aggregate[R]. National Center for Asphalt Technology, 2015.
- [13] Kevin D Hall. A comparison of fine aggregate specific gravity results and variability using vacuum sealing and SSD methods[A]. 2002 Annual Meeting of the Transportation Research Board[C]. 2002.
- [14] Stephen A Cross. Evaluation of test equipment for determination of fine aggregate specific gravity and absorption[A]. 85th Annual Meeting of the Transportation Research Board[C]. 2006.
- [15] 李闯民.《公路工程集料试验规程》(JTG E42—2005)试验验证报告[R].长沙:长沙理工大学,2015.

收稿日期:2016—08—15

究[J].公路工程,2013,38(6).

- [4] 熊向辉.高速公路沥青路面半刚性基层研究[D].西安:长安大学,2007.
- [5] 于新,杜银飞.考虑集料吸水率的水泥稳定碎石最大干密度及最佳含水量理论计算方法[J].公路交通科技,2012,29(3).

收稿日期:2016—10—19