

# 影响细集料密度及吸水率的试验因素分析\*

谢建明<sup>1</sup>, 甘有为<sup>2</sup>

(1. 宁乡县城建设投资集团公司, 湖南 长沙 410610; 2. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410004)

**摘要:** 针对中国现行细集料密度与吸水率标准试验方法 T0330—2005 在测试时存在主观性、重现性及精确性上的不足, 选择 2 种常用细集料、3 个实验室, 分别对其 0.075 mm 通过率、筛分类型、浸泡类型、浸泡时间、锥形试验、转动方法、冷却时间 7 个试验因子进行测试, 汇总测试结果进行方差分析。结果表明, 0.075 mm 以下细料对试验结果影响较大, 需对 0.075 mm 以下细集料进行单独测试; 0.075 mm 以下部分要明确规定采用水洗法或干筛法获得; T0330—2005 试验方法关于细集料的浸泡方法、浸泡时间、锥形试验击实方法的规定合理。

**关键词:** 公路; 细集料; 密度; 吸水率; Plackett—Burman

**中图分类号:** U416.216

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671—2668(2017)01—0083—05

细集料的毛体积密度和吸水率是道路沥青与水泥砼(PCC)混合料设计与施工中的两个重要参数。细集料的毛体积密度被用于计算矿料间隙率和沥青混合料的有效沥青含量, 这两个是混合料设计与验收检测中的核心体积参数。对于水泥砼, 细集料吸水率被用于调整水灰比或水与胶凝材料的比例, 其影响水泥砼的工作性, 且能反映水泥砼的高低温性能与耐候性。

中国现行细集料密度与吸水率的标准试验方法是 JTG E42—2005《公路工程集料试验规程》中的 T0330—2005。按照 T0330—2005 的规定, 需将细集料浸入水中 24 h, 之后将试样在盘中摊开并缓缓吹入热风, 不断翻拌试样使其达到估计的饱和面干状态; 夯实击落 25 次, 将集料轻轻夯入锥形模具中。如果细集料在移除模具时保持原有形状, 则假定细集料表面湿润, 需进一步干燥; 若移除模具时锥形细集料开始坍塌, 则假定其达到了饱和面干状态。T0330—2005 试验方法中细集料坍落度的量并不只取决于表面水分的多少, 也取决于细集料的棱角性与纹理性, 一些细集料的饱和面干状态不是一直由锥模与夯实技术所确定。此外, 0.075 mm 筛孔通过率对坍落条件的影响会导致饱和面干状态测定不准确, 从而使毛体积密度的计算产生误差, 且 T0330—2005 方法由于浸泡需要 24 h, 导致试验无法在一个工作日内完成, 使对试验结果要求尽可能快的质量控制变得十分低效。

## 1 T0330—2005 试验因子和试验设计

为了探讨 T0330—2005 试验方法的试验环境、试验条件和试样处理方法对细集料密度和吸水率测试结果的影响, 进行重现性试验, 评价标准试验方法在操作与环境因子变动下的差异性。重现性试验所得结果可用于消除或减少试验的变异性, 从而使试验具备更高的精度。

T0330—2005 中提出的 Plackett—Burman 试验因子共有 7 个, 分别为 0.075 mm 通过率、筛分类型、浸泡类型、浸泡时间、锥形试验、转动方法和冷却时间, 每个试验因子都会对试验结果产生影响。对每个因子设定两个水平, 分别称为“高”水平与“低”水平(见表 1), 预测细集料对 T0330—2005 试验结果的影响。

基于可变因子之间相互作用的意义, 试验可用完全析因试验或部分析因试验的形式进行。鉴于毛体积密度测定中的测试参数被认为不具有高度交互性, 进行部分析因试验即可。根据 T0330—2005 试验方法设计部分析因试验, 进行 8 项测试以充分获取 7 个试验因子客观的试验结果。

T0330—2005 中重现性研究步骤及要求如下:

1) 确定每种测试方法的 7 个可变因子; 2) 确定每个因子的高低值; 3) 对 14 个因子的值(7 个因素×2 个值)建立 8 种组合, 并对每种组合进行 2 组平行试验(见表 2); 4) 需要至少 3 个实验室参加这项研究;

\* 基金项目: 江西省交通运输厅科技研究计划项目(2013Y0001)

表 1 细集料在 T0330—2005 重现性试验中的 7 个试验因子

因子编号	试验因子	T0330—2005 要求	问题	低值	高值
A	0.075 mm 通过率	将来样用 2.36 mm 标准筛过筛,除去大于 2.36 mm 的部分	0.075 mm 筛余是否影响测试结果	0	不去除
B	去除 0.075 mm 筛底的筛分类型	除去大于 2.36 mm 的部分后,筛除 0.075 mm 部分的筛分方法的影响	用干筛还是水洗去除 0.075 mm 筛底	干筛	水洗
C	浸泡类型	注入洁净水,使水面高出试样表面 20 mm 左右	浸泡类型的不同是否会导致试验结果的显著差异	6% 的水分	完全浸泡
D	浸泡时间	静置 24 h	浸泡时间能否缩短	15 h	24 h
E	锥形试验	用捣棒轻捣 25 次	击实方法的不同是否会影响试验结果	一次性击实 25 下	分 4 次击实 25 下,每次分别击实 10、10、3、2 下
F	转动方法	转动容量瓶排除气泡	手动或机械转动是否会导致统计学上不同的结果	手动	机械
G	冷却时间	在干燥器内冷却至室温	样品可否不经冷却立即称重	0	1.5 h(约 50 ℃)

表 2 细集料的 T0330—2005 重现性试验设计

因子编号	试验因子	测试组合							
		1	2	3	4	5	6	7	8
A	0.075 mm 通过率	0	0	0	0	保留 0.075 mm	保留 0.075 mm	保留 0.075 mm	保留 0.075 mm
B	去除 0.075 mm 筛底的筛分类型	干筛	干筛	水洗	水洗	干筛	干筛	水洗	水洗
C	浸泡类型	完全浸泡	6% 的水分	完全浸泡	6% 的水分	完全浸泡	6% 的水分	完全浸泡	6% 的水分
D	浸泡时间/h	24	24	15	15	15	15	24	24
E	锥形试验	一次性击实 25 下	分 4 次击实 25 下	一次性击实 25 下	分 4 次击实 25 下	分 4 次击实 25 下	一次性击实 25 下	分 4 次击实 25 下	一次性击实 25 下
F	转动方法	机械转动	手动转动	手动转动	机械转动	机械转动	手动转动	手动转动	机械转动
G	冷却时间/h	1.5	0	0	1.5	0	1.5	1.5	0

5) 至少确定 2 种材料,且这些材料必须适用于这项试验方法。

重复性试验所需试验材料(细集料)为:花岗岩(吸水率=0.4%);石灰石(吸水率=1.5%)。考虑到每种测试方法需要 2 种材料,在每个实验室共进行 128 次测试(8 种组合×2 组平行试验×4 种测试方法×2 种材料)。

## 2 试验结果与分析

由于试验数据较多,限于篇幅,在此只给出对试验数据的方差分析结果,详细试验数据参照文献[12]中的附录 I 和文献[15]。2 种细集料的毛体积密度、表干密度、表观密度和吸水率的  $F$  统计量见表 3~6。依照 T0330—2005 的建议,在 5% 的概

率下考虑因子在高低值之间变化的影响。根据这种影响水平的  $F$  分布表确定的  $F$  临界值为 5.59。因此,如果因子的  $F$  统计量大于等于 5.59,就应该考虑因子在高低值之间变化的显著影响。

表 3 细集料毛体积密度的  $F$  统计量

细集料岩性	实验室	集料吸水率/%	各因子的 $F$ 统计量						
			A	B	C	D	E	F	G
花岗岩	1	0.4	36.8	NS	NS	13.7	NS	NS	NS
	2	0.4	54.4	NS	NS	NS	6.2	NS	NS
	3	0.4	6.9	NS	NS	NS	5.8	NS	NS
石灰岩	1	1.5	60.3	NS	NS	25.8	NS	NS	NS
	2	1.5	32.4	NS	NS	12.7	NS	7.8	NS
	3	1.5	109.3	11.9	NS	21.7	6.5	NS	62.2

注:NS 表示不显著;数字为  $F$  超过临界值 5.59 的计算值。下同。

表 4 细集料表干密度的  $F$  统计量

细集料岩性	实验室	集料吸水率/%	各因子的 $F$ 统计量						
			A	B	C	D	E	F	G
花岗岩	1	0.4	32.1	NS	NS	6.5	NS	NS	NS
	2	0.4	53.2	NS	NS	NS	6.3	NS	NS
	3	0.4	NS	NS	NS	NS	6.4	NS	NS
石灰岩	1	1.5	25.4	NS	NS	18.5	NS	NS	NS
	2	1.5	32.4	NS	NS	12.5	NS	8.1	6.4
	3	1.5	132.3	8.4	NS	25.4	6.8	NS	24.2

表 5 细集料表观密度的  $F$  统计量

细集料岩性	实验室	集料吸水率/%	各因子的 $F$ 统计量						
			A	B	C	D	E	F	G
花岗岩	1	0.4	17.4	NS	NS	NS	NS	NS	26.2
	2	0.4	25.0	NS	NS	NS	NS	NS	5.9
	3	0.4	10.5	NS	NS	NS	NS	NS	20.1
石灰岩	1	1.5	NS	NS	NS	NS	NS	NS	27.3
	2	1.5	6.2	NS	NS	NS	NS	NS	20.3
	3	1.5	NS	NS	NS	NS	NS	NS	111.2

表 6 细集料吸水率的  $F$  统计量

细集料岩性	实验室	集料吸水率/%	各因子的 $F$ 统计量						
			A	B	C	D	E	F	G
花岗岩	1	0.4	74.3	107.5	NS	185.2	18.5	23.0	232.0
	2	0.4	23.1	NS	NS	NS	NS	NS	NS
	3	0.4	13.3	NS	NS	NS	NS	NS	9.0
石灰岩	1	1.5	241.3	NS	14.9	76.0	NS	1.3	121.0
	2	1.5	24.5	NS	NS	11.6	NS	NS	NS
	3	1.5	51.4	13.2	NS	12.5	NS	NS	115.0

表 3~6 中每个显著的重现性因子次数百分比见表 7。如果试验参数或重现性系数在一项试验分

析中统计学所占比例 $\geq 33.4\%$ , 则其影响十分显著。根据表 7 对 7 个试验因子的影响进行分析。

表 7 T0330—2005 在细集料(花岗岩和石灰石)显著性中重现性因子次数百分率

因子编号	试验因子	低值	高值	显著性所占百分率/%			
				毛体积密度	表干密度	表观密度	吸水率
A	0.075 mm 通过率	保留 0.075 mm	不保留 0.075 mm	100	83.5	66.8	100
B	去除 0.075 mm 筛底的筛分类型	干筛	水洗	16.7	16.7	0	33.4
C	浸泡类型	完全浸泡	6%的水分	0	0	0	16.7
D	浸泡时间	15 h	24 h	66.8	66.8	0	66.8
E	锥形试验	一次性击实 25 下	分 4 次击实 25 下	50	50	0	16.7
F	转动方法	机械转动	手动转动	16.7	16.7	0	33.4
G	冷却时间	0	1.5 h(约 50 ℃)	16.7	33.4	100	66.8

## 2.1 0.075 mm 通过率大小的影响

在对细集料样品进行试验时, 0.075 mm 筛余的存在与否使毛体积密度、表干密度、表观密度及吸水率的试验结果皆产生了统计学上的差异。用来确定细集料饱和面干状态的锥体和夯实方法是基于集料(约 71.6°)锥体的休止角大于其干燥情况下的休止角, 但又小于其颗粒间存在毛细管水情况下的休止角的条件, 然而细集料的休止角受几种材料性能的影响, 如 0.075 mm 组分的含量和可塑性。

T0330—2005 中只对用于试验的细集料需小于 2.36 mm 作出了规定, 而对于 0.075 mm 通过率这一影响因子并未作出要求。鉴于 0.075 mm 通过率对测试结果的显著影响, 应单独对 0.075 mm 这一档料进行测试。

## 2.2 集料粒径采用干筛法或水洗法的影响

将 0.075 mm 以下细集料中分离出来的干筛或水洗法, 使细集料的吸水率、毛体积密度、表干密度和吸水率皆产生了统计学上的差异。

由于 T0330—2005 对 0.075 mm 通过率未作要求, 0.075 mm 这一档料的筛分可采用干筛或水洗两种方法, 但规程需选择其中一种筛分方法。

## 2.3 集料浸泡方法的影响

对于细集料, 在水中完全浸泡试验样品或添加至少 6% 的水分会使毛体积密度、表干密度和吸水率的试验结果产生统计学上的差异。此处, 集料浸泡类型建议按照 T0330—2005 的规定, 注入洁净水, 并使水面高出试样表面 20 mm 左右。

## 2.4 集料浸泡时间的影响

浸泡时间是一个重要的试验因子, 浸泡试验样

品 15 或 24 h 会使毛体积密度、表干密度和吸水率结果产生统计学上的差异, 表明骨料颗粒在超过指定时间时可继续吸水, 特别是吸水性材料。

表 7 所示数据显示浸泡时间的长短对细集料的试验结果有显著影响, 缩短浸泡时间会产生与现行规程显著不同的数据。因此, 浸泡时间依然按照现行规程静置 24 h。

## 2.5 锥形试验击实次数的影响

一次性击实 25 次或分 4 次击实 25 次使低吸水率细集料的毛体积密度和表干密度产生了统计学上的差异。锥形试验击实次数按照 T0330—2005 的规定执行, 将试样装入饱和面干试模中, 用捣棒轻捣 25 次即可。

## 2.6 转动方法的影响

机械转动或手动转动消除气泡会对低吸水率细集料的吸水率产生显著影响。

T0330—2005 只要求转动容量瓶以排除气泡, 并未对转动方法作出要求, 可用机械转动或手动转动两种方法, 但在试验过程中转动方法需保持一致。

## 2.7 冷却时间的影响

当样品能安全地从烘箱中拿出来或在样品降温冷却至适合处理温度(大约 50 ℃)时, 需立即确定烘箱干燥集料样本的干燥质量。然而冷却时间的不同会使低吸水率细集料的表干密度、表观密度和吸水率产生统计学上的差异。

冷却时间可依照 T0330—2005 的规定, 将细集料烘干至恒重后, 在干燥器内冷却至室温, 再称取干样的质量。但鉴于其对试验结果的显著影响, 应规

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].

响[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

(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].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