

水泥稳定碎石强度的测量不确定度分析

谢佳伟¹,唐利民^{1*},肖约¹,蔡婉²

(1.长沙理工大学 公路养护技术国家工程实验室,湖南 长沙 410114; 2.中交四航局广州南沙工程有限公司)

摘要:为了分析水泥稳定碎石强度试验结果的离散性,提高强度结果使用的精确性。该文采用 MTS 开展了 5% 水泥剂量、90 d 龄期的单轴压缩、四点弯曲和劈裂强度试验,并利用测量不确定度理论对不同应力状态下的水泥稳定碎石强度进行不确定度的评定与分析。通过分析试件不均匀性和强度数学模型输入量引入的不确定度对强度试验结果精确性的影响程度,获得了 3 种应力状态下的水泥稳定碎石强度的扩展不确定度,并提出以扩展不确定度报告转换的强度区间结果。结果表明:试件的不均匀性是影响水泥稳定碎石强度试验结果精确性的主要因素,以扩展不确定度报告转换的强度区间包含试验测量误差的结果,可以反映出强度试验过程的复杂性;相比于规范对强度试验结果的处理方法,强度区间在表达上更简洁直观。对于在规范临界值附近的强度测量值,其是否合格应该考虑测量不确定度的影响范围。在利用强度参数验算道路设计指标时,为了获得更大的保障,建议以强度区间的下端点值为实测强度的代表值。

关键词:道路工程;水泥稳定碎石;强度试验;测量不确定度

水泥稳定碎石材料的强度是衡量基层耐久性的重要指标。国内外大都采用多种耗资少、周期短的室内强度试验方法来研究其力学性能。为了准确测得水泥稳定碎石的强度,JTG D50—2017《公路沥青路面设计规范》对强度的测试方法和测试结果都有很高的要求。为了分析误差因素并定量评价误差大小,众多国际组织联合起来提出了测量不确定度理论。相比于传统的误差概念,不确定度理论用误差在某一置信水平下可能落入的区间来表征测量结果的质量,该评定与表示方法更符合实际情况,也更科学。

近年来,随着测量不确定度理论的逐步完善,其科学的评定方法已经得到了国内外众多学者的认可,并在材料力学试验和车辆碰撞模型等方面均有所应用,且取得了较为成功的研究成果。上述研究推广了测量不确定度的应用领域,然而,在道路工程中,很少有关于提高基层材料强度结果精确性的研究。由于缺乏考虑试验不确定性带来的影响,导致目前的研究结果往往与实际情况存在一定的偏差。

水泥稳定碎石强度试验结果的偏差大,为了有效评价强度结果,JTG D50—2017《公路沥青路面设计规

范》对测量结果附加了平均值、标准差、变异系数和 95% 保证率值的要求,其数据处理程序较为繁琐,并且无法直观地呈现强度结果的偏差范围。因此,有必要对水泥稳定碎石的强度进行不确定度的评定与分析,并获得一种直观准确的表示方法。该文根据 JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(以下简称“规程”),采用 MTS 材料测试系统对水泥稳定碎石进行 3 种应力状态下的强度试验,根据 GB/T 27418—2017《测量不确定度评定与表示方法》(以下简称“方法”),分析并评定 3 种应力状态下的强度测量不确定度。

1 试件成型与试验准备

1.1 原材料与配合比

水泥稳定碎石选用复合硅酸盐水泥,强度等级为 PC 32.5 级,水泥剂量为 5%,按照规程检验各项技术指标,检测结果如表 1 所示。集料采用石灰岩,经检测,其技术指标均满足规程要求。水泥稳定碎石的级配设计如图 1 所示。

收稿日期:2020—04—14(修改稿)

基金项目:国家重点研发计划项目(编号:2017YFC0805300);湖南省教育厅优秀青年项目(编号:15B010)

作者简介:谢佳伟,男,硕士研究生。E-mail: xjwcwcsust@163.com

* 通信作者:唐利民,男,博士(后),高级实验师。E-mail: tlm@csust.edu.cn

表 1 水泥指标检验结果

试验项目	单位	测试结果	规范要求
细度	%	1.8	≤10
初凝时间	min	285	≥180
终凝时间	min	422	≥360
安定性	mm	2.8	≤5
3 d 抗折强度	MPa	5.2	≥2.5
3 d 抗压强度	MPa	21.9	≥10
MgO 质量分数	%	3.5	≤5
SO ₃ 质量分数	%	1.6	≤5
比表面积	m ² /kg	390	300~450

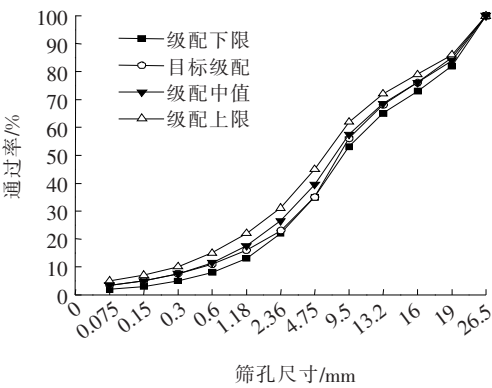


图 1 水泥稳定碎石矿料级配曲线

1.2 试件成型

按照规程的试件成型方法,水泥稳定碎石采用振动压实法确定的最大干密度为 2.349 g/cm³,最佳含水量为 5.15%。据此,制作水泥剂量为 5%的试件,其中,圆柱体试件尺寸为 ϕ150 mm×150 mm,梁式试件的尺寸为 450 mm×150 mm×150 mm。试件的成型均采用垂直振动的方法,成型后,将试件置于温度为 (20±2)℃、湿度不小于 95%的标准养生室内养生。

2 强度测试分析

2.1 强度测试模型

(1) 单轴压缩强度计算公式

$$R_e = \frac{P}{A}$$
(1)

$$A = \frac{1}{4} \pi D^2$$
(2)

式中: R_e 为单轴压缩试件强度(MPa); P 为试件所受的破坏荷载(kN); A 为试件接触面积(mm²); D 为单

轴压缩试件的直径(mm)。

(2) 四点弯曲强度计算公式

$$R_s = \frac{Pl}{bh^2}$$
(3)

式中: R_s 为抗压试件强度(MPa); b 为试件宽度(mm); h 为试件高度(mm); l 为两支点的跨距(mm)。

(3) 劈裂强度计算公式

$$R_t = 0.004\,178 \frac{P}{h}$$
(4)

式中: R_t 为劈裂强度(MPa)。

2.2 强度试验及结果分析

将试件养生至 90 d,并在强度试验前将试件置于 (20±2)℃的条件下浸水 24 h,保持水面在试件顶上约 2.5 cm。单轴压缩、四点弯曲和劈裂强度试验均在 MTS 万能材料试验机上进行。为了充分考虑水泥稳定碎石在成型和长时间养生过程中试件均质性的差异,对每种强度试验均进行 15 次平行测试。根据强度计算公式(1)~(4),不同应力状态下的水泥稳定碎石强度结果如表 2 所示。

表 2 水泥稳定碎石强度结果

测量次数	单轴压缩 强度/MPa	四点弯曲 强度/MPa	劈裂强度/ MPa
1	13.55	1.49	2.11
2	14.34	1.12	2.92
3	13.67	1.40	2.34
4	14.95	1.24	2.57
5	15.84	1.11	2.21
6	12.35	1.31	2.27
7	11.08	1.46	1.90
8	15.33	1.21	1.81
9	10.28	1.54	2.86
10	11.59	1.69	2.28
11	17.25	1.52	2.62
12	10.98	1.97	3.02
13	16.14	1.78	2.07
14	12.37	1.86	2.73
15	11.88	1.17	1.96
平均值/MPa	13.44	1.46	2.38
标准差/MPa	2.14	0.27	0.39
变异系数/%	15.92	18.74	16.29
95%保证率值	9.92	1.01	1.74

由表 2 可知:水泥稳定碎石的 3 种应力强度试验结果差异性均较大。不同强度试验结果的变异系数大小排列为:四点弯曲 18.74%>劈裂 16.29%>单轴压缩 15.92%。显然,相比于道路材料的其他性能试验结果,水泥稳定碎石强度的试验结果存在较大的离散性。然而,强度试验结果除了与试件的组成材料有关外,测试仪器和计算模型参数的精确性都会对每次强度的取值产生影响。为了系统地分析强度结果差异性的主要原因,需要对水泥稳定碎石的强度进行不确定度分析与评定。

3 强度测量不确定度的影响因素

根据不确定度的评定方法,将利用统计分析方法计算的标准不确定度称为 A 类评定,将无法使用统计学进行计算的不确定度统称为 B 类评定。平行试件的不均匀性会导致强度测量结果产生差异性,这种差异可以直接利用若干试件的强度测量结果进行统计分析,属于 A 类评定方法。此外,由强度的数学模型分析可知,试件尺寸和破坏荷载的测量误差是影响强度计算结果的直接影响量。其中,圆柱体试件尺寸的测量误差包括试件的高度 h 和直径 D ,梁式试件尺寸的测量误差包括高度 h 、宽度 b 和梁的跨距 l 。破坏荷载 P 的测量误差主要是由试验机的测量精度和数据采集系统的误差引起。针对由试件尺寸和试验机引入的测量不确定度,可采用 B 类评定方法分析。综上,不同应力状态下的强度不确定度影响因素及评定方法如表 3 所示。

表 3 影响水泥稳定碎石强度结果测量准确性的主要因素

应力状态	影响因素	不确定度评定方法类型
单轴压缩	试件不均匀性	A 类
	试件尺寸 D 测量误差	B 类
	破坏荷载 P 测量误差	B 类
四点弯曲	试件不均匀性	A 类
	试件尺寸 b 测量误差	B 类
	试件尺寸 h 测量误差	B 类
	梁跨距 l 测量误差	B 类
	破坏荷载 P 测量误差	B 类
劈裂	试件不均匀性	A 类
	试件尺寸 h 测量误差	B 类
	破坏荷载 P 测量误差	B 类

4 强度测量不确定度的评定

4.1 试件不均匀性引入的测量不确定度

根据表 2 实测的强度结果,对不同应力状态下,由试件不均匀性引入的测量不确定度采用 A 类评定方法。在统计方法中,采用贝赛尔公式进行计算:

$$u(R)=\sqrt{\frac{1}{n(n-1)}\sum_{i=1}^n(R_i-\overline{R})^2} \tag{5}$$

式中: $u(R)$ 为强度的标准不确定度(MPa); n 为重复测量次数; R_i 为第 i 个强度的测量值(MPa); \overline{R} 为强度测量结果的平均值(MPa)。

根据式(5),在不同应力状态下,由试件不均匀性引入的强度标准不确定度分别为:单轴压缩 $u_e(R)=0.53$ MPa;四点弯曲 $u_s(R)=0.07$ MPa;劈裂 $u_t(R)=0.10$ MPa。

以水泥稳定碎石强度的平均值为期望值,则因试件不均匀性引入的相对标准不确定度分别为:

单轴压缩强度: $u_{rel,e}(R)_1=u_e(R)/\overline{R_e}=3.98\%$;四点弯曲强度: $u_{rel,s}(R)_1=u_s(R)/\overline{R_s}=4.69\%$;劈裂强度: $u_{rel,t}(R)_1=u_t(R)/\overline{R_t}=4.07\%$ 。

由上述计算结果分析可知:不同应力状态下的水泥稳定碎石强度由试件不均匀性引入的相对不确定度大小及比较关系为: $u_{rel,s}(R)=4.69\%>u_{rel,t}(R)=4.07\%>u_{rel,e}(R)=3.98\%$ 。结合表 2 对强度变异系数的分析可知,水泥稳定碎石强度由试件不均匀性引入的相对不确定度和变异系数呈正相关关系:变异系数越大,试件越不均匀,相对不确定度也就越大。并且两者的应力状态大小次序均为四点弯曲>劈裂>单轴压缩,即在水泥稳定碎石的强度试验中,四点弯曲强度受试件不均匀性的影响最显著。分析原因为:梁式试件的体积比圆柱体试件要大得多,在成型及养生过程中,影响试件强度形成的因素也更多;另外,四点弯曲试验条件相比而言也更加复杂。

4.2 强度数学模型输入量引入的测量不确定度

4.2.1 试件尺寸及梁跨距引入的测量不确定度

圆柱体试件高度 h 和直径 D ,梁试件宽度 b 和高度 h 的测量误差引起的不确定度主要是由测量工具的精度和示值误差造成的;而梁式试件在加载时,跨距 l 由试验装置来控制,因此梁跨距 l 的测量误差引起的不确定度是由试验装置的加工精度引起的。根据测量不确定度的 B 类评定方法,标准不确定度的计算公

式为:

$$u(x)=\frac{a}{k} \tag{6}$$

式中: $u(x)$ 为尺寸测量误差的标准不确定度(mm); a 为误差值的区间半宽度; k 为包含因子,不同分布类型的包含因子 k 如表4所示。

表 4 常见分布类型的 k 值

两点分布	反正弦分布	矩阵(均匀)分布	梯形分布	三角分布	正态分布
1	$\sqrt{2}$	$\sqrt{3}$	2	$\sqrt{6}$	3

(1) 测量工具精度引入的不确定度

试件的尺寸均由钢直尺测得,其规定的最大允许误差为±0.1 mm,按均匀分布考虑,则由直尺精度引入的标准不确定度为:

$$u(b_1)=u(h_1)=u(D_1)=0.1/\sqrt{3}=0.06\text{ mm}$$

(2) 示值误差引入的不确定度

钢直尺的最小分辨率为1 mm,按均匀分布考虑,故由示值误差引入的标准不确定度为:

$$u(b_2)=u(h_2)=u(D_2)=1/\sqrt{3}=0.58\text{ mm}$$

测量工具精度和示值误差引起的不确定度相互独立,则梁式试件宽度的合成标准不确定度为:

$$u(b)=\sqrt{u(b_1)^2+u(b_2)^2}=0.58\text{ mm}$$

以梁式试件标准宽度为期望值,则由宽度测量误差引入的相对不确定度为:

$$u_{rel}(b)=0.58/150=0.39\%$$

试件高度和直径由测量误差引入的相对不确定度与宽度的分析方法相同,则试件高度和直径由测量误差引入的相对不确定度为:

$$u_{rel}(b)=u_{rel}(h)=u_{rel}(D)=0.58/150=0.39\%$$

(3) 试验装置加工精度引入的不确定度

试验装置加工误差控制在±1 mm,按均匀分布考虑,则梁式试件弯曲强度由跨距误差引入的标准不确定度为:

$$u(l)=1/\sqrt{3}=0.58\text{ mm}$$

以梁式试件试验要求的跨距为期望值,故相对不确定度为:

$$u_{rel}(l)=0.58/450=0.13\%$$

4.2.2 破坏荷载测量误差引入的不确定度

根据文献[15],破坏荷载的测量不确定度主要由MTS试验机的测量精度和计算机数据采集系统的误差引入。按B类评定方法计算,破坏荷载测量误差引

入的不确定度分析如下:

(1) 试验机测量精度引入的不确定度

MTS试验机示值误差为±0.5%,采用均匀分布,则破坏荷载由试验机测量精度引入的相对不确定度为:

$$u_{rel}(P_1)=0.5\%/\sqrt{3}=0.29\%$$

(2) 数据采集系统误差引入的不确定度

根据文献[15]数据采集系统的校准要求,MTS试验机的数据采集系统引入的相对不确定度为: $u_{rel}(P_2)=0.2\%$ 。

以上两个因素相互独立,故破坏荷载由MTS试验机引入的相对不确定度为:

$$u_{rel}(P)=\sqrt{u_{rel}(P_1)^2+u_{rel}(P_2)^2}=0.35\%$$

5 合成标准不确定度

5.1 强度数学模型输入量的合成相对不确定度

根据测量不确定度的传播定律,当各输入量彼此独立时,计算量的合成相对不确定度可按下式计算:

$$u_c^2(y)=\sum_{i=1}^N [c_i u_{rel}(x_i)]^2=\sum_{i=1}^N u_i^2(y) \tag{7}$$

$$c_i=\frac{\partial f}{\partial x_i}, u_i(y)=|c_i| u_{rel}(x_i) \tag{8}$$

式中: $u_c(y)$ 为合成相对不确定度; c_i 为灵敏系数(或传播系数); $u_{rel}(x_i)$ 为各输入量的相对不确定度。

根据式(7),由不同应力状态的强度数学模型输入量合成的测量不确定度计算式如下。

(1) 单轴压缩强度输入量的合成相对不确定度:

$$u_{crel,e}(R)_2=\frac{u_{c,e}(R)}{R_e}=\sqrt{\frac{\left(\frac{\partial R_e}{\partial p}\right)^2 u_e(p)^2+\left(\frac{\partial R_e}{\partial D}\right)^2 u_e(D)^2}{R_e^2}}=\sqrt{u_{rel,e}^2(P)+4 u_{rel,e}^2(D)}=\sqrt{(0.35\%)^2+4\times(0.39\%)^2}=0.85\%$$

(2) 四点弯曲强度输入量的合成相对不确定度:

$$u_{crel,s}(R)_2=\frac{u_{c,s}(R)}{R_s}=\sqrt{\frac{\left(\frac{\partial R_s}{\partial P}\right)^2 u_s(P)^2+\left(\frac{\partial R_s}{\partial l}\right)^2 u_s(l)^2+\left(\frac{\partial R_s}{\partial b}\right)^2 u_s(b)^2+\left(\frac{\partial R_s}{\partial h}\right)^2 u_s(h)^2}{R_s^2}}=\sqrt{u_{rel,s}^2(P)+u_{rel,s}^2(l)+u_{rel,s}^2(b)+4 u_{rel,s}^2(h)}=$$

$$\sqrt{(0.35\%)^2+(0.13\%)^2+(0.39\%)^2+4\times(0.39\%)^2}=0.95\%$$

(3) 劈裂强度输入量的合成相对不确定度:

$$u_{rel,t}(R)_2=\frac{u_{c,t}(R)}{R_t}=\sqrt{\frac{\left(\frac{\partial R_t}{\partial P}\right)^2 u_t(P)^2+\left(\frac{\partial R_t}{\partial h}\right)^2 u_t(h)^2}{R_t^2}}=\sqrt{u_{rel,t}^2(P)+u_{rel,t}^2(h)}=\sqrt{(0.35\%)^2+(0.39\%)^2}=0.52\%$$

5.2 计算水泥稳定碎石强度的合成相对不确定度

由试件不均匀性和数学模型输入量的测量误差引入的不确定度相互独立,根据不确定度的传播定律,不同应力状态下的水泥稳定碎石强度的合成相对不确定度计算式如下。

(1) 单轴压缩强度的合成相对不确定度:

$$u_{rel,e}=\sqrt{u_{rel,e}(R)_1^2+u_{rel,e}(R)_2^2}=4.07\%$$

(2) 四点弯曲强度的合成相对不确定度:

$$u_{rel,s}=\sqrt{u_{rel,s}(R)_1^2+u_{rel,s}(R)_2^2}=4.78\%$$

(3) 劈裂强度的合成相对不确定度:

$$u_{rel,t}=\sqrt{u_{rel,t}(R)_1^2+u_{rel,t}(R)_2^2}=4.11\%$$

5.3 水泥稳定碎石强度测量不确定度汇总

根据以上对不同应力状态下的水泥稳定碎石强度测量不确定度的计算,列出水泥稳定碎石强度测量不确定度的分量汇总如表 5 所示。

表 5 水泥稳定碎石强度测量不确定度分量汇总

应力状态	影响因素	相对不确定度/%	合成相对不确定度/%
单轴压缩	试件不均匀性	3.98	4.07
	试件尺寸 D 测量误差	0.39	
	破坏荷载 P 测量误差	0.35	
四点弯曲	试件不均匀性	4.69	4.78
	试件尺寸 b 测量误差	0.39	
	试件尺寸 h 测量误差	0.39	
	梁跨距 l 测量误差	0.13	
	破坏荷载 P 测量误差	0.35	
劈裂	试件不均匀性	4.07	4.11
	试件尺寸 h 测量误差	0.39	
	破坏荷载 P 测量误差	0.35	

由表 5 可知:相比其他因素对强度不确定度的影响程度,由试件不均匀性引入的不确定度贡献量:在单轴压缩强度中占比达 97.7%;在四点弯曲强度中占比

达 98.2%;在劈裂强度中占比达 99.3%。由此可知,无论何种应力状态下,水泥稳定碎石强度的不确定度主要来自试件的不均匀性。而输入量的测量误差对水泥稳定碎石强度测量不确定度的贡献占比很小,一般情况下,可以忽略不计。

6 强度的扩展不确定度及不确定度报告

扩展不确定度为合成不确定度与包含因子的乘积,按下式计算。

$$U=\overline{R}\cdot k\cdot u_{rel}\tag{9}$$

式中: U 为强度的扩展不确定度(MPa); \overline{R} 为强度测量结果的平均值(MPa); k 为包含因子; u_{rel} 为合成相对不确定度。

根据测量不确定度在工业技术领域的应用要求,一般取置信概率为 95%时的包含因子 $k(k=2)$ 。则不同应力状况下的水泥稳定碎石强度扩展不确定度分别为:单轴压缩强度 $U_e=\overline{R}_e\cdot k\cdot u_{rel,e}=1.09\text{ MPa}$;四点弯曲强度 $U_s=\overline{R}_s\cdot k\cdot u_{rel,s}=0.14\text{ MPa}$;劈裂强度 $U_t=\overline{R}_t\cdot k\cdot u_{rel,t}=0.20\text{ MPa}$ 。

因此,不同应力状况下的水泥稳定碎石强度的扩展不确定度报告可表示为:单轴压缩强度 $R_e=13.38\text{ MPa}$, $U=1.09\text{ MPa}$, $k=2$;四点弯曲强度 $R_s=1.46\text{ MPa}$, $U=0.14\text{ MPa}$, $k=2$;劈裂强度 $R_t=2.38\text{ MPa}$, $U=0.20\text{ MPa}$, $k=2$ 。

根据不同应力状态下的扩展不确定度报告,以强度的平均值为中值,以扩展不确定度为半区间宽度,将不确定度报告按照 $[\overline{R}-U,\overline{R}+U]$ 转换为区间形式。则基于测量不确定度评定的强度区间结果分别为:单轴压缩强度区间为 $[12.35,14.53]\text{ MPa}$;四点弯曲强度区间为 $[1.32,1.60]\text{ MPa}$;劈裂强度区间为 $[2.18,2.57]\text{ MPa}$ 。当对比多个水泥稳定碎石同类型的强度区间时,应以具有较小扩展不确定度值的区间结果更为优选择。为方便分析,将表 2 中规范方法计算的强度平均值与 95%保证率值以及利用不确定度评定的强度区间汇总,结果见图 2。

由图 2 可知:在不同的应力状态下,各强度由规范方法计算的平均值均位于强度区间内,而具有 95%保证率的强度值均位于强度区间之下。相比于规范方法要求的强度平均值、标准差、变异系数和 95%保证率值为试验结果的计算值,以基于测量不确定度理论评定方法转换的强度区间在表达上更简洁直观。

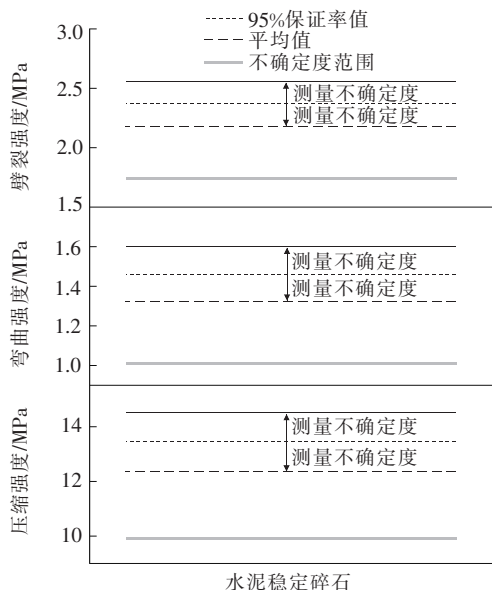


图2 不同分析方法下的水泥稳定碎石强度

一方面,强度区间包含了对强度测量试验全过程的影响范围值,即综合考虑了各种误差影响量的结果;另一方面,虽然水泥稳定碎石的扩展不确定度相对于强度均值并不大,但当测量结果位于规范临界值附近时,其结果是否合格应该考虑测量不确定度的影响范围。水泥稳定碎石强度作为道路基层设计材料的试验参数,其大小将直接影响路基设计指标的验算结果。因此,为了能充分考虑室内试验误差对路基设计的影响,建议以不利条件下,结合测量不确定度理论转换的强度区间,以区间强度下端点值为实测强度的代表值。

7 结论

测量不确定度是对测量结果质量的定量表征,在一定程度上反映了试验测量过程的误差影响大小。该文通过对水泥稳定碎石在3种应力状态下的强度试验和不确定度的分析与评定,得到以下结论:

(1) 3种应力状态下的水泥稳定碎石强度结果的变异系数越大,试件越不均匀,其相对不确定度也越大。相比于其他应力状态,四点弯曲强度受试件不均匀性引入的不确定度最大。

(2) 无论何种应力状态下,试件的不均匀性是水泥稳定碎石强度测量不确定度最主要的影响因素。一般情况下,由强度输入量引入的不确定度可忽略不计。该文评定的不同应力状态强度的不确定度报告可供同试验条件下的水泥稳定碎石强度试验参考。

(3) 水泥稳定碎石强度区间包含了试验测量误差

的影响大小,可以充分反映出试验过程的复杂性及测量结果的不确定性范围。因此,强度区间在表达上更符合实际情况,相比规范方法的计算结果更加直观。

(4) 对于在规范临界值附近的强度测量结果,其是否合格应该考虑测量不确定度的影响范围。为了使水泥稳定碎石强度试验结果能提供最大保障的设计指标验算结果,建议以区间强度下端点值为实测强度的代表值。

参考文献:

- [1] 孙雅珍,李凯翔,丁传超,等. 稳定碎石土底基层材料力学参数试验研究[J]. 中外公路,2018(1).
- [2] 彭杰,洪岭岭,曹强. 水泥稳定碎石基层的层底拉应力影响因素分析[J]. 中外公路,2017(2).
- [3] XIE J W, TANG L M, LU S T, et al. Standardization of Fatigue Characteristics of Cement-Treated Aggregate Base Materials under Different Stress States[J]. Applied Sciences, 2018, 8(9): 1 500—1 522.
- [4] LU S T, LIU C C, LAN J T, et al. Fatigue Equation of Cement-Treated Aggregate Base Materials under a True Stress Ratio[J]. Applied Sciences, 2018, 8(5): 691—707.
- [5] 吕松涛,郑健龙,仲文亮. 养生期水泥稳定碎石强度、模量及疲劳损伤特性[J]. 中国公路学报, 2015(9).
- [6] JTG D50—2017 公路沥青路面设计规范[S].
- [7] Busch P, Lahti P, Juhapekka P, et al. Measurement Uncertainty[J]. Instrumentation & Measurement Magazine IEEE, 2016, 9(3): 44—51.
- [8] 王鲁. 测量不确定度的评定及其在力值计量中的应用与研究[D]. 浙江大学硕士学位论文, 2014.
- [9] Beckert S F, Domeneghetti G, Bond D. Using Historical Results Obtained in the Tensile Tests for a Type Evaluation of Uncertainty[J]. Measurement, 2014, 51(5): 420—428.
- [10] 刘国寿,王时越,刘寒芳,等. 半刚性材料抗弯拉强度的测定及不确定度评定[J]. 科学技术与工程, 2010(27).
- [11] 刘志强,刘恒,汪澎,等. 基于不确定度理论的汽车与二轮车碰撞车速计算及验证方法研究[J]. 公路交通科技, 2016(5).
- [12] JTG E51—2009 公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S].
- [13] GB/T 27418—2017 测量不确定度评定与表示方法[S].
- [14] 倪育才. 实用测量不确定度评定[M]. 北京: 中国计量出版社, 2009.
- [15] JJF 1103—2003 万能材料试验机计算机数据采集系统评定[S].