

混凝土试块抗压强度试验测量不确定度评定

邹晓宏¹ 何云斌² 陈升玉³ 苏国辉³

1 云南省第四公路桥梁工程有限公司 2 云南交投集团投资有限公司 3 云南航天工程物探检测股份有限公司

DOI:10.12238/pe.v2i5.9881

[摘要] 本文采用2019版国标《混凝土物理力学性能试验方法标准》对边长为100mm的C30强度等级混凝土立方体试块进行抗压强度试验,依据2017版国标《测量不确定度评定和表示》对试验测量结果不确定度进行分析和评定,分析了影响混凝土试块抗压强度测量不确定度的主要因素及合成标准不确定度的公式推导,最终得出测量不确定度评定报告,可为同行在评定同类试验测量结果不确定度时提供参考与借鉴。

[关键词] 混凝土试块; 抗压强度; 测量不确定度; 评定

中图分类号: TV331 文献标识码: A

Evaluation of Uncertainty in Measurement of Compressive Strength Test of Concrete Test Blocks

Xiaohong Zou¹ Yunbin He² Shengyu Chen³ Guohui Su³

1 Yunnan Fourth Highway Bridge Engineering Co.,Ltd

2 Yunnan Communications Investment Group Investment Co.,Ltd

3 Yunnan Aerospace Engineering Geophysical Testing Co.,Ltd

[Abstract] This article uses the 2019 version of the national standard "Test Methods for Physical and Mechanical Properties of Concrete" to conduct compressive strength tests on C30 strength grade concrete cube specimens with a side length of 100mm. Based on the 2017 version of the national standard "Evaluation and Representation of Measurement Uncertainty", the uncertainty of the test measurement results is analyzed and evaluated. The main factors affecting the measurement uncertainty of concrete specimens and the formula for synthesizing standard uncertainty are analyzed. Finally, a measurement uncertainty evaluation report is obtained, which can provide reference and guidance for peers in evaluating the uncertainty of measurement results in similar tests.

[Key words] concrete test block; Compressive strength; Measurement uncertainty; evaluate

引言

近年来,国家对各试验室检测、校准结果的可靠性要求越来越高,除了获得检测或校准结果之外,还要求各试验室给出检测或校准结果的测量不确定度^[1]。本文详细介绍了混凝土试块抗压强度试验测量不确定度评定方法。

1 测量不确定度定义及分类

测量不确定度是合理赋予被测量参数的值的分散性。

测量不确定度分为标准不确定度和扩展不确定度,标准不确定度又分为合成标准不确定度、A类标准不确定度和B类标准不确定度。采用统计学原理分析类的方法对实验数据进行的标准不确定度评定,称为A类不确定度评定,用实验数据标准偏差来表示。用实验或其他信息来源来评定的标准不确定度评定,称为B类不确定度评定。

2 测量过程及数学模型

2.1 测量过程

在规定环境条件下,先用相同配合比的混凝土材料制作30块边长为100mm的混凝土立方体试块,然后放在标养室养护28天后取出,用游标卡尺分别测量每个试块的边长,精确至0.1mm,计算受压面积时,按照公称尺寸进行计算。同时还应测量混凝土试块的平面度和相邻面间夹角,试件承压面平面度公差不得超过0.0005d(d为试件边长)。试件相邻面间夹角应为90°,其公差不得超过0.5°。如所测混凝土试块均满足上述标准要求后,将混凝土试块放置在设置好加荷速率的万能试验机上进行混凝土试块抗压强度试验,当加载至混凝土试块破坏时,记录此时混凝土试块的破坏荷载。

2.2 数学模型^[2]

表1 破坏荷载示值读数数值

组数J	检测人员	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
破坏荷载 F (kN)	第1人	361.394	359.546	354.723	350.868	362.517	362.728	362.228	366.650	364.458	362.630
	第2人	362.712	358.865	356.169	362.364	366.863	367.375	368.355	361.329	350.834	350.440
	第3人	369.301	360.562	358.307	354.747	361.427	357.266	368.103	358.581	356.288	354.878
标准差 s_i		4.236	0.854	1.803	5.848	2.876	5.060	3.467	4.102	6.857	6.170
破坏荷载总平均值 \bar{F}		360.417									

混凝土立方体试块抗压强度的计算公式如下:

$$f_{cc} = 0.95 \times \frac{F}{L^2}$$

式中: f_{cc} - 混凝土试块抗压强度 (MPa);

F - 混凝土试块破坏荷载平均值 (N);

L - 试块边长平均值 (mm)。

3 影响测量不确定度的主要因素

影响测量不确定度的主要因素: 样品不均匀性、测量设备、试验人员、环境温湿度条件及检测方法缺陷等因素。

本次混凝土立方体试块抗压强度试验均严格按照2019版国标《混凝土物理力学性能试验方法标准》进行试验, 对不符合试验标准要求的试块已经进行了剔除处理, 故环境湿度的变化、试块不平整度及不垂直度、加荷速度对测量结果不确定度的轻微影响可忽略不计。

混凝土试块抗压强度测量不确定度计算模型引入的不确定度分量为: 试块边长允许偏差、破坏荷载测量及数值修约。

4 测量数据(见表1)

5 标准不确定度分量的评定^{[1][3]}

5.1 试块边长允许偏差引入的不确定度分量

依据混凝土物理力学性能试验方法标准, 混凝土试块边长允许偏差为±1mm, 即误差范围在-1mm~+1mm之间, 在此区间范围内混凝土试块边长出现偏差的概率服从均匀分布, 可用B类方法评定, 即:

$$u_{(L)} = \frac{a}{k} = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0.577 \text{ mm}$$

5.2 破坏荷载测量引入的不确定度分量

5.2.1 试验人员重复性及试块不均匀性引入的不确定度分量

试验人员对混凝土试块破坏荷载重复读数的结果, 可用A类标准不确定度进行评定。依据表1破坏荷载数值先用贝塞尔公式计算出各组试块的标准差 s_i , 再求出合并样品标准差 $s_{p,F}$, 即:

$$s_{p,F} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m s_i^2} = 4.516 \text{ KN}$$

合并样品标准差 $s_{p,F}$ 能否可用, 需经过判定, 因此, 还需求出标准差数列 s_i 的标准差 $\sigma_{F_i}(s)$ 及估计标准差 $\hat{\sigma}_{\bar{F},F}(s)$, 即:

$$\sigma_{F_i}(s) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (s_i - \bar{s})^2}{m-1}} = 1.932 \text{ KN}$$

$$\hat{\sigma}_{\bar{F},F}(s) = \frac{s_{p,F}}{\sqrt{2(n-1)}} = 2.258 \text{ KN}$$

如 $\sigma_{F_i}(s) < \hat{\sigma}_{\bar{F},F}(s)$, 则表明测量过程及状态稳定可控, 被测量也未超过预估值, 即各组混凝土试块破坏荷载测量标准差相差较小, 合并样品标准差 $s_{p,F}$ 可用来求出标准不确定度分量 $u_{(F,1)}$, 反之则用各组试块中的最大标准差 s_{\max} 来求取标准不确定度分量 $u_{(F,1)}$ 值。

在实际测量中, 通常以单次测量值 ($k=1$) 作为测量结果来进行评定, 故欲求的标准不确定度分量为:

$$u_{(F,1)} = \frac{s_{p,F}}{\sqrt{k}} = 4.516 \text{ KN}$$

5.2.2 试验机示值误差引入的标准不确定度分量

I级万能试验机, 其示值误差为±1.0%, 误差在此区间[-1.0%~1.0%]出现的概率是均匀的, 用B类方法评定, 即:

$$u_{\text{rel}}(F,2) = \frac{a}{k} = \frac{1\%}{\sqrt{3}} = 0.577\%$$

由表1可知破坏荷载F总平均值 $\bar{F} = 360.417 \text{ KN}$, 故该因素引入的绝对标准不确定度为:

$$u_{(F,2)} = \bar{F} \times u_{\text{rel}}(F,2) = 360.417 \times 0.577\% = 2.0796 \text{ KN}$$

5.2.3 测力仪引入的标准不确定度分量

使用0.3级标准测力仪检定的万能试验机, 其检定源的不确定度为0.3%, 置信因子 $k=2$, 故引入的B类相对标准不确定度为:

$$u_{\text{rel}}(F,3) = \frac{0.3\%}{2} = 0.15\%$$

因此, 此因素所引入的绝对标准不确定度为:

$$u_{(F,3)} = \bar{F} \times u_{\text{rel}}(F,3) = 360.417 \times 0.15\% = 0.541 \text{ KN}$$

5.2.4 读数分辨率引入的标准不确定度分量

本次混凝土试块抗压强度试验所使用的万能试验机分辨率 $\delta_x = 1 \text{ KN}$, 故由此引入的标准不确定度分量为:

$$u_{(F,4)} = 0.29 \times \delta_x = 0.29 \times 1 = 0.29 \text{ KN}$$

由于人员重复性、混凝土试块不均匀性、示值误差、校准源、读数分辨率引入的不确定度分量间彼此独立不相关, 故可依据下式合成得到破坏荷载测量引入的绝对标准不确定度总分量, 即:

$$u(F) = \sqrt{u_{(F,1)}^2 + u_{(F,2)}^2 + u_{(F,3)}^2 + u_{(F,4)}^2} =$$

$$\sqrt{4.516^2 + 2.0796^2 + 0.541^2 + 0.29^2} = 5.00947 \text{ KN}$$

5.3 数值修约引入的不确定度分量

依据2019版国标《混凝土物理力学性能试验方法标准》，混凝土立方体试件抗压强度修约到0.1MPa，可用B类不确定度来评定，修约间隔为 δ_x ，则 $u(x) = 0.29\delta_x$ 。即：

$$u(f_{cc,rou}) = 0.29\delta_x = 0.29 \times 0.1 = 0.029 \text{ N/mm}^2$$

6 合成标准不确定度的公式推导及评定^{[1][3]}

合成标准不确定度是在一个数学计算模型中由各输入量引入的标准测量不确定度分量经计算之后输出的测量标准不确定度。当输入量间明显相关时，必须考虑其相关性，反之则不考虑。合成标准不确定度用符号 u_c 表示，所用合成方法，称为不确定传播率，而传播系数被称为灵敏系数，用 c_i 表示。

由前述分析可知，影响测量不确定度模型传播公式的输入量分别为试块边长允许偏差、破坏荷载测量及数值修约引入的不确定度分量，则测量模型标准不确定度输出量估计值公式为：

$$y=f(F,L,f_{cc,rou})=f_{cc} + f_{cc,rou}=0.95 \times F/L^2 + f_{cc,rou}$$

对该函数进行全微分处理，则该三元函数全微分方程为：

$$d_y = \frac{\partial y}{\partial F} dF + \frac{\partial y}{\partial L} dL + \frac{\partial y}{\partial f_{cc,rou}} df_{cc,rou}$$

将上式全微分方程两边同时进行平方后展开，则有：

$$\begin{aligned} d_y^2 &= \left(\frac{\partial y}{\partial F} dF + \frac{\partial y}{\partial L} dL + \frac{\partial y}{\partial f_{cc,rou}} df_{cc,rou} \right)^2 \\ &= \left(\frac{\partial y}{\partial F} dF \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial L} dL \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial f_{cc,rou}} df_{cc,rou} \right)^2 + 2 \times \frac{\partial y}{\partial F} \times \frac{\partial y}{\partial L} \times dF \times dL \times r(F,L) \\ &\quad + 2 \times \frac{\partial y}{\partial F} \times \frac{\partial y}{\partial f_{cc,rou}} \times dF \times df_{cc,rou} \times r(F,f_{cc,rou}) + 2 \\ &\quad \times \frac{\partial y}{\partial L} \times \frac{\partial y}{\partial f_{cc,rou}} \times dL \times df_{cc,rou} \times r(L,f_{cc,rou}) \end{aligned}$$

因混凝土试块边长允许偏差、破坏荷载测量及数值修约所引入的不确定度分量间彼此独立不相关，故各分量间的相关关系均为零，即 $r(F,L) = r(F,f_{cc,rou}) = r(L,f_{cc,rou}) = 0$ 。故上述公式可简化为：

$$d_y^2 = \left(\frac{\partial y}{\partial F} dF \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial L} dL \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial f_{cc,rou}} df_{cc,rou} \right)^2$$

令 $d_y = u_c(y)$ 、 $dF = u(F)$ 、 $dL = u(L)$ 、 $df_{cc,rou} = u(f_{cc,rou})$ $C_F = \frac{\partial y}{\partial F}$ 、 $C_L = \frac{\partial y}{\partial L}$ 、

$C_{f_{cc,rou}} = \frac{\partial y}{\partial f_{cc,rou}}$ ，则上述公式可转换为：

$$u_c^2(y) = c_F^2 u^2(F) + c_L^2 u^2(L) + c_{f_{cc,rou}}^2 u^2(f_{cc,rou})$$

依据不确定度传播律，合成标准不确定度 u_c 可用方和根公式进行计算。其中，相应的不确定度灵敏系数 c_F 、 c_L 及 $C_{f_{cc,rou}}$ 可由测量不确定度的输出量公式对各输入量求偏导数得到，即：

$$C_F = \frac{\partial y}{\partial F} = 0.95 \times \frac{1}{L^2}; \quad C_L = \frac{\partial y}{\partial L} = -2 \times 0.95 \times \frac{F}{L^3}; \quad C_{f_{cc,rou}} = \frac{\partial y}{\partial f_{cc,rou}} = 1$$

上述推导出来的公式两边同时开方即为合成标准不确定度 u_c 的计算公式。因 $C_{f_{cc,rou}} = 1$ ，故可由下列公式计算出混凝土试块

抗压强度试验结果的合成标准不确定度。即：

$$u_c(f_{cc}) = \sqrt{c_F^2 u^2(F) + c_L^2 u^2(L) + u^2(f_{cc,rou})}$$

计算所需的各标准不确定度分量汇总表详见表2。

表2 不确定度分量汇总表

分量	不确定度来源	标准不确定度分量值
U(L)	试块边长允许偏差	U(L)=0.577 mm
U(F)	破坏荷载测量	U(F)=5009.47 N
	人员重复性及材质不均匀性	U(F, 1)=4516 N
	试验机示值误差	U(F, 2)=2079.6 N
	标准测力仪的不确定度	U(F, 3)=541 N
U(f _{cc,rou})	试验机读数分辨力	U(F, 4)=290 N
	数值修约(间隔为0.1N/mm ²)	0.029 N/mm ²

将各不确定度分量和灵敏系数代入下列计算公式，即可求得其合成标准不确定度 u_c 值：

$$u_c(f_{cc}) = \sqrt{c_F^2 u^2(F) + c_L^2 u^2(L) + u^2(f_{cc,rou})} = 0.64 \text{ N/mm}^2$$

7 扩展不确定度的评定^{[1][3]}

扩展不确定度U由合成标准不确定度乘置信因子k得到。置信因子k值一般取2，有时取3，取决于数学计算模型输出量的概率分布类型及选取的置信概率，当k=2时，置信概率为95%，当k=3时，置信概率为99%。扩展不确定度分为U和U_p两种，在给出测量结果时，一般情况下只需给出测量结果的扩展不确定度U。

混凝土试块抗压强度试验扩展不确定度计算结果如下：

$$U = u_c(f_{cc}) \times k = 0.64 \times 2 = 1.3 \text{ N/mm}^2$$

8 抗压强度测量结果及不确定度报告^{[1][3]}

混凝土试块抗压强度试验结果及不确定度计算可在Excel表中编辑公式计算，只需输入测量数据、测量工具检定证书出具的不确定度、置信因子、示值误差、分辨力、数值修约精度及试块允许偏差，即可计算出各标准不确定度的分量值并给出不确定度报告。混凝土试块抗压强度测量不确定度评定自动计算表详见表3。

8.1 混凝土试块抗压强度

$$f_{cc} = 0.95 \times \frac{F}{L^2} = 0.95 \times \frac{360.417 \times 1000}{100 \times 100} = 34.2 \text{ N/mm}^2$$

8.2 混凝土试块抗压强度不确定度报告

本次混凝土试块抗压强度测量结果的不确定度报告如下：

$$f_{cc} = 34.2 \text{ N/mm}^2; \quad U = 1.3 \text{ N/mm}^2; \quad k = 2$$

如果以相对扩展不确定度的形式来报告，则为：

$$f_{cc} = 34.2 \text{ N/mm}^2; \quad U_{rel} = 3.8\%; \quad k = 2$$

表3 混凝土试块抗压强度测量不确定度评定自动计算表

混凝土试块抗压强度试验不确定度评定涉及参数一览表												
数值修约	混凝土试块样品信息			万能试验机		测力仪		度盘				
强度修约(N/mm ²)	试块边长L(mm)	允许偏差(±mm)	等级	示值误差(±%)	等级	不确定度	置信因子	分辨力(kN)				
0.1	100	1	1级	1.0%	0.3级	0.30%	2	1				
检测数据												
组数J	检测人员	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
破坏荷载F(kN)	第1人	361.394	359.546	354.723	350.868	362.517	362.728	362.228	366.650	364.458	362.630	
	第2人	362.712	358.865	356.169	362.364	366.863	367.375	368.355	361.329	350.834	350.440	
	第3人	369.301	360.562	358.307	354.747	361.427	357.266	368.103	358.581	356.288	354.878	
标准差S _j		4.236	0.854	1.803	5.848	2.876	5.060	3.467	4.102	6.857	6.170	
极限荷载总平均值 F _下		4.516				标准差数列的标准差 $\sqrt{\sigma F(S)}$		360.417	1.932		估计标准差 $\hat{\sigma}$ 估,F(S)	2.258
检测人员重复性及试块材质不均匀性带来的标准不确定度分量u(F,1)						4.516						
试验机示值误差引起的绝对标准不确定度分量u(F,2)						2.0796						
标准测力仪引入的绝对标准不确定度分量u(F,3)						0.541						
读数分辨力引入的标准不确定度分量u(F,4)						0.289						
极限荷载实验力值测量绝对标准不确定度总分量u(F)						5009.47						
试验检测结果												
抗压强度 f _{cc} (N/mm ²)						34.2						
合成标准不确定度												
抗压强度合成标准不确定度uc(f _{cc}) (N/mm ²)						0.64						
扩展不确定度/相对扩展不确定度												
表达方式1	抗压强度扩展不确定度U (N/mm ²)					1.3						
表达方式2	抗压强度相对扩展不确定度U _{rel}					3.8%						
测量不确定度报告												
表达方式1	扩展不确定度		f _{cc} =	34.2	N/mm ² ;	U=	1.3	N/mm ² ;	k=	2		
表达方式2	相对扩展不确定度		f _{cc} =	34.2	N/mm ² ;	U _{rel} =	3.8%	;	k=	2		
各标准不确定度分量												
试块长度允许偏差引起的标准不确定度分量	实验力值测量所引起的标准不确定度分量u(F)						数值修约所引起的标准不确定度分量 U(f _{cc} ,rou)					
	检测人员重复性及试块材质不均匀性所带来的标准不确定度分量	试验机示值误差所引起的相对标准不确定度分量	标准测力仪所引入的相对标准不确定度分量	读数分辨力引入的标准不确定度分量	U(f _{cc} ,rou) (N/mm ²)		U(f _{cc} ,rou) (N/mm ²)					
U(L) (mm)	U(F,1) (kN)	U _{rel} (F,2)	U _{rel} (F,3)	U(F,4) (kN)	0.029							
0.577	4.516	0.577%	0.15%	0.289								

9 结论

(1) 测量不确定度是合理赋予被测量参数的值的分散性。是测量结果的质量控制指标。不确定度越小，则测量结果与被测量参数的真值愈接近，可靠度越高，反之则测量结果与被测量参数的真值偏离愈大，可靠度越低。

(2) 混凝土试块抗压强度测量结果不确定度评定的难点在于找出影响混凝土试块抗压强度测量结果不确定度的主要因素以及合成标准不确定度的公式推导。

(3) 本文着重分析了影响混凝土试块抗压强度测量结果不确定度的来源、主要影响因素及合成标准不确定度的公式推导，并对试验结果的测量不确定度进行了分析、计算和评定，并最终

给出测量不确定度的评定报告。

[参考文献]

- [1]CNAS-GL009:2018,材料理化检测测量不确定度评定指南及实例[S].北京:中国合格评定国家认可委员会,2018.
- [2]GB/T 50081-2019,混凝土物理力学性能试验方法标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [3]GB/T 27418-2017,测量不确定度评定和表示[S].北京:中国标准出版社,2018.

作者简介:

邹晓宏(1974--),男,汉族,云南楚雄人,本科,道路桥梁工程技术专业,工程师,从事隧道桥梁工程技术研究与应用工作。