

# 基于点荷载试验的混凝土强度快速测定与评价方法

柳覃欣 汪钰浩 程康 陈勇 刘庆庆 张琳琳 陶云培

合肥工业大学土木与水利工程学院

DOI:10.32629/btr.v3i4.3037

**[摘要]** 点荷载强度试验(PLT)是岩石力学中的一种简单而广泛的用于预测岩石抗压强度的试验方法,但在预测混凝土抗压强度方面是一种较新的方法。本项目通过不同强度等级混凝土试件的点荷载强度和单轴抗压强度试验,对试验数据进行回归分析,建立混凝土的点荷载强度和单轴抗压强度相关性的经验方程;通过误差分析,对该方程的准确性和可靠性进行分析评价。在此基础上,提出利用点荷载进行混凝土强度快速测定以及评价的步骤和方法。

**[关键词]** 点荷载强度; 单轴抗压强度; 不规则试件; 置信区间

在岩石强度测定方面,点荷载实验法较为成熟,相关经验方程已经建立,但于混凝土强度测定,利用点荷载试验法较少,利用不规则试件进行点荷载实验法测定强度可避免制作标准试件的繁琐过程,且对试验要求较低。

本文拟通过不同等级混凝土试件,分别进行对应等级不规则试件点荷载试验及标准立方块单轴抗压强度试验,收集可信数据,回归分析,进而得出一套基于点荷载试验的混凝土强度快速测定与评价方法。

## 1 试验材料与试验方法

### 1.1 试件制备

试验混凝土样块制作材料为水泥,细砂,石子等,采用宣城市本地原材料。根据项目要求,制作150mm×150mm×150mm的立方体试件作为单轴抗压强度标准试件,共制作 C25、C30、C40、C50四组不同强度的混凝土试块,实验室标准环境下养护28天后即可进行试验。



图1 材料晾晒



图2 材料筛分

点荷载试验取用不规则试件,在养护结束后,将试块破碎,对于端面不平整而无法放置在锥头上的试件,用手锤略加修整,剔除有明显缺陷或破损的部分。一般情况下,作为点荷载加载试验的方块体或块状试件最长边尺寸L在50mm±35mm,两加载点间距D与加载处平均宽度B之比宜为0.3—1.0之间,均可近似认为满足实际需要。

### 1.2 试验仪器准备

(1) 尺寸为150mm×150mm×150mm的模具:用于制备各等级的混凝土标准立方体试件。

(2) 电子秤:精确称量所需材料的质量。

(3) 数显游标卡尺:在点荷载强度试验中,测量试件加载点间距D及通过两加载点最小截面的宽度或平均宽度W。

(4) 手锤:修饰端面不平整的试件。

(5) 点荷载仪器:包括千斤顶(10t)、传感器、游标标尺、承压框架、加载锥头、液晶显示表、电池等。

### 1.3 试验方法

点荷载试验是将挑选出的符合尺寸的不规则混凝土试块放置在两个球状的加载锥头之间,通过千斤顶对混凝土试样施加集中荷载,直至试样破坏,然后记录混凝土试块破坏的最大荷载强度,再根据测量的破坏荷载和通过两加载点最小截面的宽度或平均宽度W,来计算混凝土的点荷载强度。

### 1.4 数据处理

#### 1.4.1 点荷载强度计算<sup>①</sup>

对于不规则混凝土样试件,其点荷载强度大小为:

$$I_s = \frac{P}{D_e^2}$$

式中  $I_s$ —未经修正的混凝土点荷载强度。

$P$ —混凝土点荷载破坏荷载。

$D_e^2$ —等价混凝土圆心直径。

为使不同尺寸岩石试验的结果具有可靠性,必须采用尺寸修正。即将不同尺寸的点荷载强度修正为等效岩心直径 $D_e$ 等于50mm的点荷载强度 $I_{s(50)}$ ,即标准点荷载强度,按下式计算:

$$I_{s(50)} = \left(\frac{D_e}{50}\right)^{0.45} I_s$$

#### 1.4.2 混凝土抗压强度 $f_{cu,k}$ 计算<sup>①</sup>

混凝土抗压强度是以边长150mm150mm150的立方体试件作为抗压强度标准试件,使用万能试验机进行强度检测,试件的抗压强度计算公式:

$$f_{cu,k} = \frac{P}{A}$$

以三个试件抗压强度的算术平均值作为该组强度等级的混凝土抗压强度值,精确至0.1Mpa,三个测值中的最大值或者最小值如有其中一个误差超过中间值的±15%时,则取中间值作为改组试件的抗压强度值  $f_{cu,k}$ ,如果两个测值与中间值的差均超过±15%,则试验无效,需重新取试件测定,

每个试验组测定10组立方体抗压强度值。

1.4.3 建立换算公式<sup>(1)</sup>

将每组混凝土强度等级试验分组中的15个经修正后点荷载强度  $I_{s(50)}$  去掉一个最大值和一个最小值求其算术平均值  $I_{s(50)}$  与其同试验分组测得的  $f_{cuk}$  作为一个离散点 ( $f_{cuk}, I_{s(50)}$ )，即每组混凝土强度等级采集10个离散点数据，共100组离散点数据，使用SPSS软件进行数据拟合得出线性回归方程， $f_{cuk} = \gamma I_{s(50)}$ ，计算其相关性系数  $R^2$ 。

(1) 区间估计法<sup>(1)</sup>

前提条件为该指标服从正态分布  $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ ，则X置信水平为  $1 - \alpha$  的置信区间为：

$$\left( \bar{x} - t_{\frac{\alpha}{2}} \frac{S}{\sqrt{n-1}}, \bar{x} + t_{\frac{\alpha}{2}} \frac{S}{\sqrt{n-1}} \right)$$

式中为均值，S为标准差，n为样本容量， $t_{\frac{\alpha}{2}}$  为t分布的双侧分位数

(2) 统计参数标准值的确定

由概率数理统计表查得：置信度为95%，其t分布双侧位数为1.971956。分别确定均值、标准差S。

2 试验结果分析

2.1 各试验块试验情况

本次试验共进行C25、C30、C40、C50四个等级混凝土点荷载试验，每等级共分为5组，每组收集20-30个点荷载试验数据及单轴抗压强度数据，经过95%置信区间对数据进行筛选，共有C25等级26组数据，其他三组各30组试验数据。

2.2 点荷载强度试验

2.2.1 不同的破坏荷载面积对点荷载试验中的尺寸、形状的效应没有较大影响，在一定程度上消除了点荷载试验中的尺寸、形状的效应问题。试验数据采用Excel数据表格进行计算，保证计算精确，无错误。

序号	混凝土点荷载破坏荷载 P (N)	加载点间距 D (mm)	两加载点最小截面的宽度或平均宽度 W (mm)	4*W*W (mm <sup>2</sup> )	等价混凝土圆心直径 De <sup>2</sup> (mm <sup>2</sup> )	等价混凝土圆心直径 De (mm)	Is值 (Mpa)	Is50	Is50保留四位小数
5140	50	62.5	63.078	1.29	1.43				
6400	55	62.5	66.16	1.46	1.66				
1660	31	32	35.54	1.31	1.13				
2080	28	41.5	38.46	1.41	1.25				
2230	33	45	43.48	1.18	1.11				
2310	40	37.5	43.70	1.21	1.14				
3150	40	47.5	49.18	1.30	1.29				
4080	38	50	49.18	1.69	1.67				
2440	37	50	48.53	1.04	1.02				
2760	46	36.5	46.24	1.29	1.25				
1970	32	36	38.30	1.34	1.19				
1160	23	33.5	31.32	1.18	0.96				
2190	41.1	38.5	44.91	1.09	1.03				
2710	33	49.5	45.61	1.30	1.25				
2550	38	46.5	47.43	1.13	1.11				
3610	47	49.5	54.43	1.22	1.27				
3370	48	47.5	53.88	1.16	1.20				
3760	40	44.5	47.61	1.66	1.62				
4030	42	52.5	52.99	1.44	1.47				
3920	43	45	49.64	1.59	1.59				
2000	34	38.5	40.82	1.20	1.10				
2700	38	43	45.61	1.30	1.25				
3290	42	49	51.20	1.26	1.27				
2230	27	49.5	41.25	1.31	1.20				
2470	41	44.5	48.20	1.06	1.05				
5370	51	67	66.00	1.23	1.40				

利用计算公式(括号内为Excel自动计算公式)，通过测量混凝土点荷载破坏荷载及加载点间距及两加载点最小截面宽度或平均宽度，计算  $4*W*W(=4*C4*D4)$ ，等级混凝土圆心直径  $De^2(=E4/PI())$ ，等价混凝土圆心直径  $(=SQRT(F4))$ ，Is值  $(=B4/F4)$ ，Is50  $(=POWER(G4/50, 0.45)*H4)$ ，Is50保留四位小数  $(=FLOOR(I4, 0.0001))$ 。

2.2.2 点荷载强度试验直方图及正态分布曲线、数据分析。以C25等级混凝土为例，通过95%置信区间，将C25等级A组不符合要求数据进行淘汰，删除。

统计		标准错误
V10 平均值	1.450129	.1731251
平均值的 95% 置信区间	下限 1.083121	
	上限 1.817138	
5% 剪除后平均值	1.410466	
中位数	1.266100	
方差	.510	
标准偏差	.7138131	
最小值	.3930	
最大值	3.2212	
全距	2.8282	
四分位距	.9374	
偏度	.978	.550
峰度	1.129	1.063

图3 C25A组数据分析

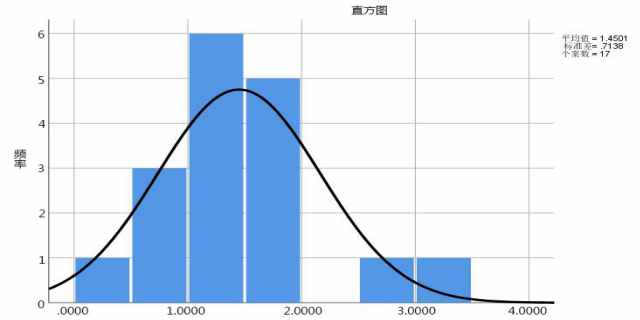


图4 C25点荷载数据正态回归分析

由图可以看出，该组数据平均值的95%置信区间<sup>(3)</sup>上下限为1.817138, 1.083121，且该组数据较好满足正态分布，大多数数据集中在1.0-1.5之间。经过对C25等级A, B, C, D, E组进行如上分析，共筛选出26组可靠数据。

表1 C25等级点荷载强度试验结果统计

混凝土点荷载破坏荷载 P (N)	加载点间距 D (mm)	两加载点最小截面的宽度或平均宽度 W (mm)	等价混凝土圆心直径 De (mm)	Is 值 (Mpa)	Is50 (Mpa)
5140	50	62.5	63.078	1.29	1.43
6400	55	62.5	66.16	1.46	1.66
1660	31	32	35.54	1.31	1.13
2080	28	41.5	38.46	1.41	1.25
2230	33	45	43.48	1.18	1.11
2310	40	37.5	43.70	1.21	1.14
3150	40	47.5	49.18	1.30	1.29
4080	38	50	49.18	1.69	1.67
2440	37	50	48.53	1.04	1.02
2760	46	36.5	46.24	1.29	1.25
1970	32	36	38.30	1.34	1.19
1160	23	33.5	31.32	1.18	0.96
2190	41.1	38.5	44.91	1.09	1.03
2710	33	49.5	45.61	1.30	1.25
2550	38	46.5	47.43	1.13	1.11
3610	47	49.5	54.43	1.22	1.27
3370	48	47.5	53.88	1.16	1.20
3760	40	44.5	47.61	1.66	1.62
4030	42	52.5	52.99	1.44	1.47
3920	43	45	49.64	1.59	1.59
2000	34	38.5	40.82	1.20	1.10
2700	38	43	45.61	1.30	1.25
3290	42	49	51.20	1.26	1.27
2230	27	49.5	41.25	1.31	1.20
2470	41	44.5	48.20	1.06	1.05
5370	51	67	66.00	1.23	1.40

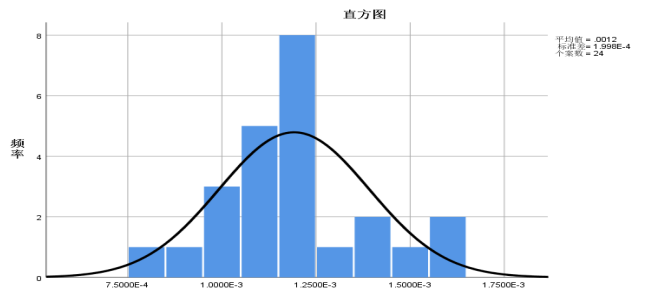


图5 C25等级点荷载数据正态回归分析

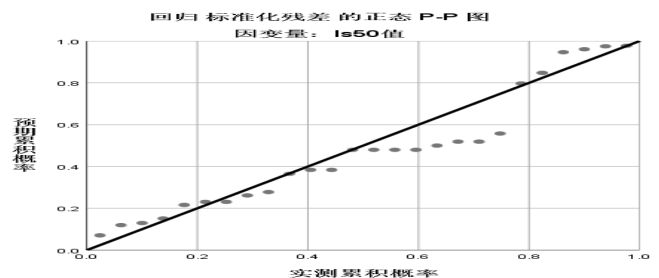


图6 C25等级点荷载数据标准化残差回归分析

模型	R	R方	调整后R方	更改统计				显著性F变化量	德宾-沃森	
				标准估计的误差	R方变化量	F变化量	自由度1			自由度2
1	.777 <sup>a</sup>	.604	.588	.20409	.604	36.671	1	24	.000	1.719

a. 预测变量: (常量), 混凝土单轴抗压强度

b. 因变量: Is50值

图7 C25等级点荷载数据相关参数分析

可以看出对C25等级混凝土来讲, 数据满足正态分布规律, 回归拟合后相关系数为0.604, 直线拟合度较好, 可以接受。D-W分析值为1.719, 接近2, 不存在序列相关问题, 显著性变化量为0, 显著性非常好。标准化残差P-P图接近一条直线, 试验数据较可靠。

2.3 单轴抗压强度试验<sup>(2)</sup>

各混凝土试验块在标准实验室养护条件下养护龄期达到28天, 因试验条件限制, 参考相关资料, 根据混凝土强度与龄期之间有较好相关性, 确定28天混凝土单轴抗压强度数值。C25等级混凝土强度为28.6Mpa, C30等级混凝土强度为31.7Mpa, C40等级混凝土强度为41.1Mpa, C50等级混凝土强度为54.4Mpa。

2.4 经验方程建立

经过数据筛选, 对室内测试共四个不同等级混凝土进行的点荷载试验, 共采集C25等级26组数据, C30、C40、C50各30组数据共116组数据进行正态回归分析, 标准化残差分析及线性回归分析。

表2 点荷载试验结果统计

强度等级	均值/KN	标准差	变异系数	置信区间	t 分布	置信度
C50	2.368	0.354	0.149	2.236-2.500	1.971956	0.95
C40	1.788	0.226	0.126	1.699-1.867		
C30	1.486	0.299	0.201	1.380-1.604		
C25	1.254	0.204	0.163	1.176-1.345		

在95%的置信度下, 通过对不同等级试件变异系数、置信区间以及标准差等进行分析可知, 整体数据变异系数较小, 离散性较好。

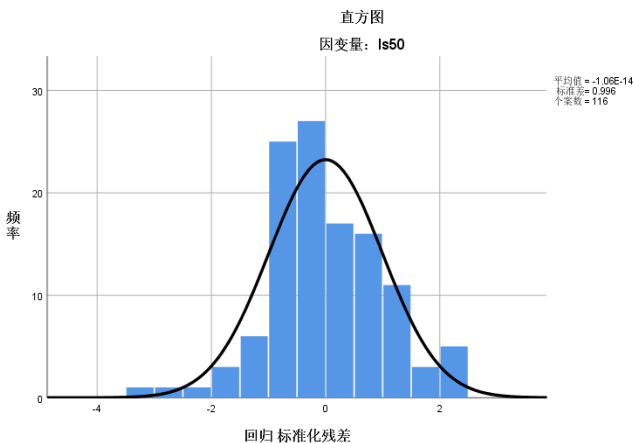


图8 点荷载数据正态分布分析

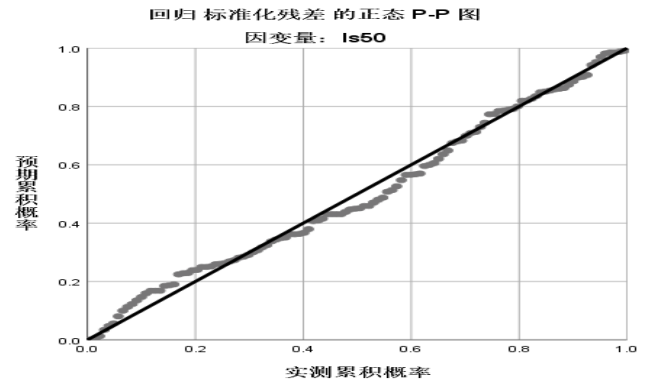


图9 点荷载数据标准化残差回归分析

方程	R方	F	模型摘要		显著性	参数估计值	
			自由度1	自由度2		常量	b1
线性	.714	284.870	1	114	.000	.117	.041

自变量为单轴抗压强度。

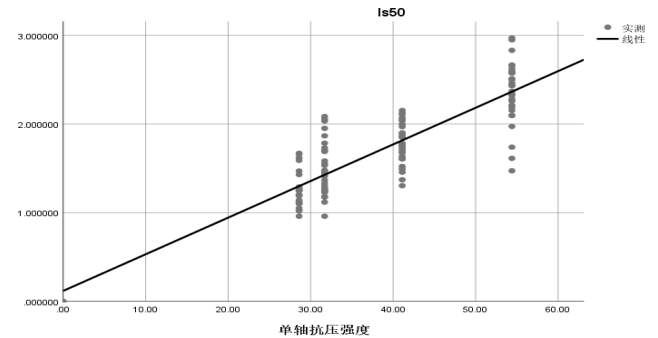


图10 散点图直线拟合分析

通过分析可以看出, 整个试验数据符合正态分布规律, R方为0.714可以接受, F数值较大, 显示平均的回归平方与平均剩余平方和之比较大, 比较好, 因不规则混凝土块点荷载强度与单轴抗压强度之间存在较好的线性相关性, 对散点进行线性回归, 得到回归系数为24.39。同向对比岩石回归系数较为接近。考虑到岩石与混凝土力学性能较为相似, 结果较为可靠。

3 结论

通过对混凝土试验块进行试验, 点荷载与混凝土单轴抗压强度之间存在相关性, 满足直线方程, 可通过该经验方程快速确定不规则混凝土试件强度, 进行评价。因本次试验条件受限, 且相关研究还未展开, 为寻求更为精确和使用广泛的公式, 还需要进一步研究。

[参考文献]

[1]和卢斌,付志亮,王强,等.岩石点荷载强度与单轴抗压强度线性关系试验[J].煤田地质与勘探,2014,42(03):68-73.  
 [2]孟贵林,吴学利,卜小林.混凝土强度规律[J].工程质量,2011,29(10):67-68.  
 [3]张元胤,李克钢.几种岩石点荷载强度与单轴抗压强度的相关性[J].金属矿山,2017,(02):19-23.