

# 高强自密实混凝土抗压强度现场 检测方法试验研究

卜良桃,赵倚天

(湖南大学土木工程学院,湖南长沙410000)

**摘要** 为了保证高强自密实混凝土现场施工质量,弥补高强自密实混凝土现场强度检测领域的空白。**方法** 采用回弹法、超声回弹综合法、先装拔出法、后装拔出法、钻芯法对强度等级为C50、C60、C70、C80、C90、C100的自密实混凝土构件进行现场强度检测,并将检测结果与留置的试件抗压强度值进行对比分析。**结果** 试验得出五种方法的测强曲线和测强公式,其相关性与精确度均良好,其中超声回弹综合法测强公式误差最小。**结论** 传统的强度检测方法仍适用于高强自密实混凝土现场强度检测,笔者提出五种检测方法的测强公式为日后的工程质量验收工作提供了指导依据。

**关键词** 现场检测;高强自密实混凝土;测强曲线;回归分析

中图分类号 TU391

文献标志码 A

## Experimental Study on On-Site Detection Method of Compressive Strength of High-Strength Self-Compacting Concrete

*BU Liangtao, ZHAO Yitian*

(School of Civil Engineering, Hu'nan University, Changsha, China, 410000)

**Abstract:** In order to ensure the quality of high-strength self-compacting concrete on-site construction, and to fill a gap in the field of high-strength self-compacting concrete field strength testing, this paper uses the rebound method, ultrasonic rebound comprehensive method, pre-loading method, post-loading method, core drilling method to test the self-compacting concrete with strength class of C50、C60、C70、C80、C90、C100. The strength curves and strength formula of the five methods are obtained through experiments, and their correlation and accuracy are good. Among them, the ultrasonic strength measurement method has the smallest error. It is concluded that the traditional strength testing method is still suitable for high-strength self-compacting concrete on-site strength testing. The strength testing formulas of the five testing methods proposed by the author provide guidance for future engineering quality acceptance work.

收稿日期:2019-10-16

基金项目:国家自然科学基金项目(51878262)

作者简介:卜良桃(1963—),男,教授,博士,主要从事土木工程结构体系及加固方法等方面研究。

**Key words:** on-site test; high strength self-compacting concrete; strength curve; regression analysis

随着建设水平的提高,混凝土工程逐渐向超高层、大跨度的方向发展,配筋方式愈加复杂、施工难度加大,进而对高强度混凝土的流动性和黏聚性提出了更高的要求<sup>[1-2]</sup>。在**高强混凝土中,高强自密实混凝土可以凭自重穿过复杂绑扎的钢筋,无需振捣即可填充到模型的各个角落,非常适合体型大、施工难度高的工程<sup>[3]</sup>。现有关于高强度自密实混凝土的研究多集中在配置领域,对现场抗压强度检测依旧采用留置立方体试件。然而留置的试件与混凝土实际受力状态不同,并不能真实反应混凝土实际工作强度<sup>[4]</sup>,因此推进**高强自密实混凝土现场检测很有必要。基于此,笔者采用回弹法、超声回弹综合法、先装拔出法、后装拔出法和钻芯法对**高强自密实******

混凝土试件进行强度检测,并将实测结果与立方体抗压强度值拟合分析,给出测强曲线和测强公式,以期**为相关规范的编制提供依据,进一步扩大相关检测方法的适用范围。**

## 1 试验方案

### 1.1 试验材料

试验采用**强度等级为 52.5 MPa 的普通硅酸盐水泥,河砂(细度模数为 3.09),碎石(集料粒径为 5 ~ 20 mm),洁净的自来水,外加剂为 ZW 自密实无收缩混凝土外加剂(湖南固力工程新材料有限责任公司生产),减水剂采用 PCA 聚羧酸高效减水剂,并掺入超细矿粉、硅灰、粉煤灰<sup>[5-6]</sup>,相应性能指标见表 1 ~ 表 3。**

表 1 矿粉性能指标

Table 1 The performance index of mineral powder

材料名称	强度	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	比表面积/(m <sup>2</sup> ·kg <sup>-1</sup> )	烧失量/%	氯离子质量分数/%	流动度比/%	含水率/%
矿粉	S95	2.89	425	0.60	0.036	102	0.28

表 2 粉煤灰性能指标

Table 2 The performance index of coal ash

材料名称	性能等级	细度/%	需水质量分数/%	烧失量/%	含水率/%
粉煤灰	I 级	12	92	3.8	0.1

表 3 硅灰性能指标

Table 3 The performance index of silica fume

材料名称	烧失量/%	氯离子质量分数/%	二氧化硅质量分数/%	比表面积/(m <sup>2</sup> ·kg <sup>-1</sup> )	含水率/%	需水质量分数/%	活性指数
硅灰	2.5	0.014	94.05	2.51 × 10 <sup>4</sup>	1.1	113	112

### 1.2 试件制作

抗压强度设置为 50 MPa、60 MPa、70 MPa、80 MPa、90 MPa、100 MPa 六个**强度等级,每一个强度等级制作 6 组构件,每一组构件包括 3 个 300 mm × 300 mm × 300 mm 的试件(依次用于先装拔出法、后装拔出法、钻芯法强度检测),3 块 150 mm × 150 mm × 150 mm 的试件(用于回弹法、超声回弹综合**

法和测定立方体抗压强度测定)。

将原材料称重并混合(配合比见表 4),加入强制式混凝土搅拌机搅拌均匀。浇筑混凝土试件,在常温条件下静置 24 h 并保持混凝土表面湿润,脱模后将试件放置于养护池中恒温养护 72 h(养护池温度为 60 ℃),之后将试件从养护池中取出,采取常温水洒水并覆盖塑料薄膜的方法养护 28 d<sup>[7]</sup>。

表4 自密实混凝土配合比

Table 4 The mixing ratio of self-compacting concrete

试验 编组	胶凝材料						水胶 比	$m(\text{水})/$ kg	$m(\text{砂})/$ kg	$m(\text{石})/$ kg	$m(\text{减水剂})/$ kg
	总质量/	$m(\text{水泥})/$	$m(\text{硅灰})/$	$m(\text{粉煤灰})/$ kg	$m(\text{矿粉})/$	$m(\text{外加剂})/$ kg					
	kg	kg	kg	kg	kg	kg					
A	331.21	226.86	0	13.61	56.71	34.03	0.31	104.06	446.70	550.00	0.95
B	353.10	254.38	15.10	15.26	30.20	38.16	0.28	97.24	440.81	550.00	1.01
C	375.32	251.32	33.74	18.82	33.74	37.70	0.25	93.01	402.58	550.00	2.15
D	376.94	253.07	33.51	18.89	33.51	37.96	0.23	86.21	411.38	550.00	2.51
E	359.91	226.87	44.11	21.10	33.80	34.03	0.22	79.12	417.07	550.00	2.75
F	347.82	224.00	44.66	11.27	34.30	33.60	0.21	74.73	420.00	550.00	2.99

### 1.3 回弹法、超声回弹综合法、立方体抗压强度检测

选取长宽高为  $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$  的试件浇筑面的侧面作为超声法的测试面,在试件两个对测面的测点上涂抹耦合剂,测出声速值  $v_1, v_2, v_3$ , 并计算声速平均值  $\bar{v}$  (精确至  $0.01\text{ km/s}$ ). 将试件上涂抹的耦合剂擦拭干净, 然后试件块置于压力机上加压  $30 \sim 50\text{ kN}$ , 在另一对侧面分别弹击 8 次(弹击点见图 1), 剔除 3 个最大值和 3 个最小值, 取余下 10 个值的平均值作为该试件超声回弹综合法测试的回弹代表值  $R$  (精确至  $0.1$ )<sup>[8-9]</sup>. 将试件进一步加压至  $60 \sim 80\text{ kN}$  (加压值在此范围内随混凝土试件强度等级提升而提高). 在保持压力的情况下, 采用相同方法在试件原耦合剂涂抹面测得回弹法平均回弹值  $R_m$ . 将试件加压至破坏, 计算试件的抗压强度值  $f_{\text{cu}}^c$  (精确至  $0.1\text{ MPa}$ ) 作为试件的立方体抗压强度值. 在破坏后的试件边缘测量试件的平均碳化深度值<sup>[10-11]</sup>.

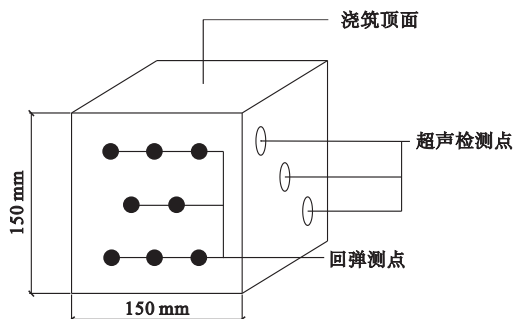


图1 回弹法测点布置示意图

Fig. 1 The schematic diagram of the rebound method

### 1.4 拔出法强度检测

#### 1.4.1 先装拔出法

在试件浇筑前选取每组中一个长宽高为  $300\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 300\text{ mm}$  试件的三个浇筑侧面的中点作为拔出测试点. 在模板侧面拔出点位置钻孔取孔洞<sup>[12]</sup>, 安放锚固件并保证锚固深度为  $25\text{ mm}$ , 且在模板外安装定位组件保持锚固件垂直(见图 2), 浇筑混凝土且对试件进行养护. 均匀施加拔出力且控制其速度在  $0.5 \sim 1.5\text{ kN/s}$ , 直至混凝土试件破坏, 记录极限拔出力值<sup>[12-14]</sup>.

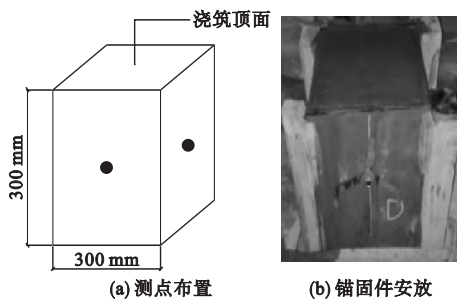


图2 拔出法示意图

Fig. 2 The schematic diagram of the pull out method

#### 1.4.2 后装拔出法

养护完毕后选取每组中一个长宽高为  $300\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 300\text{ mm}$  试件的浇筑侧面用于后装拔出检测, 并选取试件三个浇筑侧面的中点布置测点(见图 2). 用钻孔机对每个试件的测点位置进行钻孔, 钻头直径为  $25\text{ mm}$ 、钻孔深度为  $30\text{ mm}$ . 清理钻孔后向孔洞中注入锚固胶并安放锚固件, 锚固深度为  $25\text{ mm}$  且垂直于构件表面, 静置  $48\text{ h}$ . 安装

拔出仪并均匀施加拔出力直至试件破坏,记录极限拔出力<sup>[12-14]</sup>。

### 1.5 钻芯法强度检测

采用钻芯机对每组中最后剩余的长宽高为 300 mm × 300 mm × 300 mm 试件侧面中心处钻取芯样,每个试件钻透一个长芯样,并将钻透的芯样从中间切成两个短芯样,钻取点选择见图 3。对短芯样采用磨平或者补胶的方法处理端面。取游标卡尺对芯样的上部、中部、下部直径进行测量,并使用卷尺测量芯样的高度,保证芯样的实际高径比( $H/d$ )介于 0.95 ~ 1.05。采用游标量角器对芯样两个端面和母线的夹角进行测量,要求其不垂直度不得大于 1°。将试件置于压力机上施加压力至破坏,并记录抗压强度<sup>[15]</sup>。

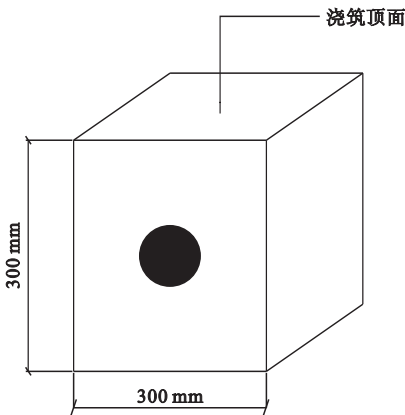
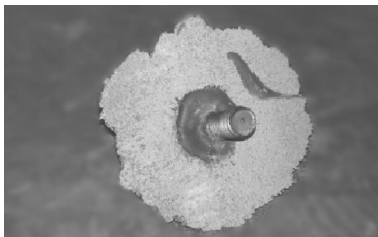


图 3 芯样钻取示意图

Fig. 3 The schematic diagram of the core sample



(a) 后装拔出法破坏体



(b) 先装拔出法破坏体

图 4 拔出法试验破坏形态

Fig. 4 The destructive forms of the pull out method test

## 2.2 试验数据及结果分析

### 2.2.1 试验数据

采用回弹法、超声回弹综合法、先装拔出

## 2 试验结果分析

### 2.1 试验现象

回弹法与超声回弹综合法为非破损检测方法,不会对混凝土表面产生损伤,且随着混凝土强度值提高,回弹值增大,超声仪测得的声速值增大。

先装拔出法与大部分后装拔出法的破坏均为椎体破坏,椎体底面平整且无裂缝,椎体表面粗糙且可见零星的粗骨料均匀分布。先装拔出法相比于后装拔出法破坏椎体更为完整,后装拔出法检测中,出现少许由于锚固胶并未完全干透或钻孔中灰尘未清理干净而导致的锚固件被整个拔出、破坏椎体不完整的现象,应对此类检测结果进行舍弃并另取检测面进行补测。此外,对于锚固件不垂直于试件表面的情况,先装拔出时应直接舍弃,后装拔出时应采取换面补测处理。在锚固深度统一为 25 mm 的前提下,伴随着混凝土强度的提高,拔出力增大,拔出破坏椎体底面直径越小。相同强度等级的混凝土试件,先装拔出法测得的拔出力大于后装拔出法且破坏椎体相对较大。破坏形式如图 4 所示。

芯样受压破坏与混凝土立方体受压破坏试验现象大致相同,均为试件周身出现均匀竖向细密裂缝,且伴随着混凝土强度等级的提高破坏荷载增大。

法、后装拔出法、钻芯法的试验结果及长宽高为 150 mm × 150 mm × 150 mm 的混凝土试件立方体抗压强度结果见表 5。

表5 试验结果

Table 5 Test data

试件 编号	回弹法		超声回弹综合法			先装拔出法		后装拔出法		钻芯法		立方体抗压强度测定分组	
分组	$R_m$	分组	$R$	$\bar{v}/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	分组	$F_p/\text{kN}$	分组	$F_p/\text{kN}$	分组	$f/\text{MPa}$	分组	$f/\text{MPa}$	
A	RA-1	53.6	PA-1	52.6	4.34	FA-1	36.63	PA-1	35.78	DA-1	52.72	CA-1	49.6
	RA-2	54.1	PA-2	53.7	4.44	FA-2	43.34	PA-2	37.91	DA-2	46.11	CA-2	52.3
	RA-3	53.0	PA-3	53.9	4.33	FA-3	38.57	PA-3	36.22	DA-3	50.23	CA-3	51.1
	RA-4	54.2	PA-4	52.2	4.50	FA-4	38.35	PA-4	32.68	DA-4	46.69	CA-4	52.1
	RA-5	53.9	PA-5	54.1	4.44	FA-5	45.18	PA-5	39.36	DA-5	53.36	CA-5	53.6
	RA-6	52.2	PA-6	53.9	4.13	FA-6	46.69	PA-6	30.22	DA-6	51.22	CA-6	47.2
B	RB-1	56.1	PB-1	55.9	4.66	FB-1	48.56	PB-1	41.01	DB-1	57.01	CB-1	61.0
	RB-2	57.2	PB-2	56.8	4.73	FB-2	45.88	PB-2	42.66	DB-2	60.62	CB-2	64.1
	RB-3	57.6	PB-3	57.2	4.72	FB-3	49.27	PB-3	44.75	DB-3	60.75	CB-3	63.2
	RB-4	56.9	PB-4	56.7	4.46	FB-4	46.74	PB-4	42.58	DB-4	61.59	CB-4	57.8
	RB-5	58.0	PB-5	57.2	4.62	FB-5	48.39	PB-5	42.56	DB-5	61.90	CB-5	62.0
	RB-6	56.9	PB-6	58.0	4.36	FB-6	42.17	PB-6	34.74	DB-6	63.24	CB-6	57.3
C	RC-1	62.1	PC-1	61.3	4.62	FC-1	52.30	PC-1	47.13	DC-1	72.13	CC-1	67.2
	RC-2	61.0	PC-2	60.2	4.74	FC-2	54.24	PC-2	45.43	DC-2	67.49	CC-2	68.1
	RC-3	62.2	PC-3	62.0	4.65	FC-3	53.06	PC-3	49.02	DC-3	69.02	CC-3	69.9
	RC-4	62.1	PC-4	61.4	4.74	FC-4	54.01	PC-4	46.38	DC-4	68.42	CC-4	70.3
	RC-5	59.4	PC-5	59.4	4.78	FC-5	55.34	PC-5	48.2	DC-5	70.20	CC-5	69.0
	RC-6	62.4	PC-6	59.1	4.84	FC-6	57.17	PC-6	46.09	DC-6	66.99	PC-6	70.0
D	RD-1	66.4	PD-1	65.3	4.71	FD-1	59.44	PD-1	53.32	DD-1	76.35	CD-1	77.0
	RD-2	66.7	PD-2	64.2	4.83	FD-2	67.21	PD-2	56.02	DD-2	77.90	CD-2	77.2
	RD-3	67.6	PD-3	66.6	4.75	FD-3	66.56	PD-3	54.96	DD-3	78.90	CD-3	79.1
	RD-4	69.0	PD-4	65.3	4.82	FD-4	65.13	PD-4	57.03	DD-4	79.03	CD-4	80.0
	RD-5	67.8	PD-5	62.7	4.96	FD-5	62.06	PD-5	58.76	DD-5	78.74	CD-5	78.3
	RD-6	66.9	PD-6	64.2	4.86	FD-6	64.09	PD-6	53.2	DD-6	77.20	CD-6	77.9
E	RE-1	70.1	PE-1	67.7	4.91	FE-1	71.01	PE-1	56.47	DE-1	85.47	CE-1	86.7
	RE-2	69.7	PE-2	68.4	4.96	FE-2	74.77	PE-2	63.34	DE-2	86.87	CE-2	88.2
	RE-3	71.2	PE-3	69.0	4.95	FE-3	73.99	PE-3	65.03	DE-3	87.65	CE-3	89.0
	RE-4	69.9	PE-4	69.6	4.85	FE-4	69.90	PE-4	55.06	DE-4	90.06	CE-4	87.4
	RE-5	69.6	PE-5	69.9	4.82	FE-5	67.26	PE-5	64.29	DE-5	92.69	CE-5	88.3
	RE-6	71.7	PE-6	70.8	4.77	FE-6	66.07	PE-6	61.81	DE-6	91.81	CE-6	86.9
F	RF-1	73.1	PF-1	72.7	4.88	FF-1	79.01	PF-1	74.47	DF-1	95.33	CF-1	95.3
	RF-2	72.7	PF-2	72.4	4.88	FF-2	77.77	PF-2	70.34	DF-2	96.34	CF-2	96.9
	RF-3	72.9	PF-3	70.3	4.87	FF-3	83.99	PF-3	73.03	DF-3	96.23	CF-3	94.2
	RF-4	71.9	PF-4	71.6	4.87	FF-4	79.90	PF-4	71.06	DF-4	95.06	CF-4	97.8
	RF-5	73.2	PF-5	72.2	4.90	FF-5	75.86	PF-5	67.29	DF-5	97.29	CF-5	96.3
	RF-6	74.1	PF-6	73.0	4.94	FF-6	76.07	PF-6	64.81	DF-6	96.81	CF-6	98.9

2.2.2 回归分析

(1) 回弹法回归分析

因试件为养护后直接用于试验操作,且测得碳化深度为0,故不再考虑碳化深度影响.根据回弹试验所测得的回弹平均值  $R_m$  和立方体试件抗压强度值  $f_{cu}^c$ ,采用最小二乘法原理进行计算<sup>[16]</sup>,参照文献<sup>[10]</sup>,假设回归方程如下所示:

$$f_{cu} = A + BR_m + CR_m^2. \quad (1)$$

回归方程的相对标准误差  $e_r$  和平均相对误差  $\delta$  按照下式计算:

$$\delta = \pm \frac{1}{n} \sum_1^n \left| \frac{f_{cu,i}^c}{f_{cu,i}} - 1 \right| \times 100\%. \quad (2)$$

$$e_r = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left( \frac{f_{cu,i}^c}{f_{cu,i}} - 1 \right)^2} \times 100\%. \quad (3)$$

式中: $\delta$  为回归方程式的强度平均相对误差,% ,精确至0.1; $e_r$  为回归方程式的强度相对标准差,% ,精确至0.1; $f_{cu,i}$  为由第  $i$  个试件抗压试验得出的混凝土抗压强度值,MPa,精确至0.1 MPa; $f_{cu,i}^c$  为由同一试件的平均回弹值  $R_m$  按回归方程式算出的混凝土强度换算值,MPa,精确至0.1 MPa; $n$  为制定回归方程式的试件数; $A、B、C$  为测强公式回归系数,MPa.

经过最小二乘法对函数进行拟合和分析并计算  $A、B、C$  值,得出高强自密实混凝土回弹法测强曲线中  $A = 10.814$  MPa、 $B = -0.244$  MPa、 $C = 0.019$  MPa (测强曲线见图5),测强曲线函数的相关系数  $r = 0.97 > 0.9$ ,平均相对误差  $\delta = 2.9\%$ ,相对标准差  $e_r = 3.7\%$ ,均符合规范要求<sup>[10]</sup>,说明测强曲线的精确程度较高.

(2) 超声回弹综合法回归分析

根据试验测得的回弹值平均值  $R$ 、声速平均值  $\bar{v}$  和试件抗压强度实测值  $f_{cu}^0$ ,进行回归分析<sup>[8]</sup>.参照文献<sup>[14]</sup>,假设回归方程如下:

$$f_{cu}^0 = XR^Y \bar{v}^Z. \quad (4)$$

式中: $X、Y、Z$  为测强公式回归系数.

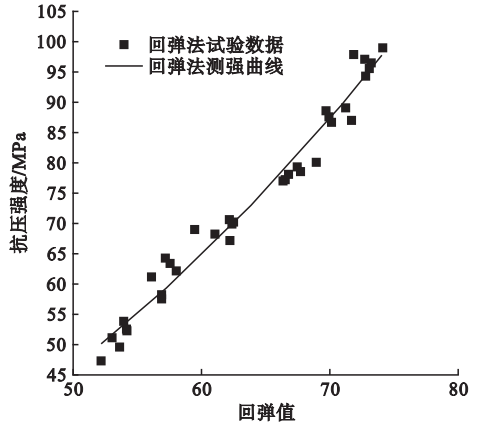


图5 回弹法测强曲线

Fig. 5 The strength curve of rebound method

经拟合分析测强曲线拟合参数  $X、Y、Z$  分别为  $X = 0.013、Y = 1.526、Z = 1.491$  (测强曲线见图6),测强曲线函数的相关系数  $r = 0.99 > 0.9$ ,相对误差 = 1.4%,平均相对误差  $\delta = 0.05\%$ ,符合规范要求<sup>[8]</sup>.

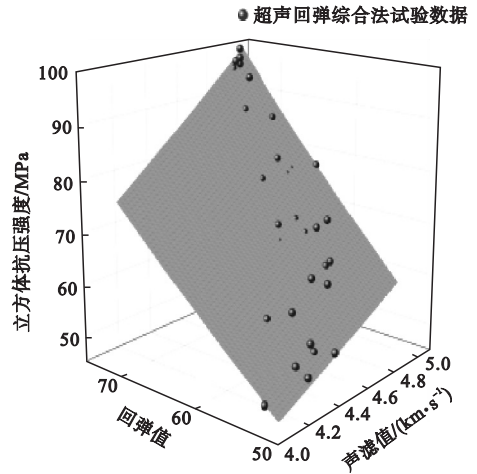


图6 超声回弹综合法测强曲面

Fig. 6 The forced surface of ultrasonic rebound comprehensive method

(3) 先装拔出法、后装拔出法回归分析

根据文献<sup>[13]</sup>的规定,假设回归方程式如下:

$$f_{cu}^c = \alpha F_p + \beta. \quad (5)$$

式中: $f_{cu}^c$  为混凝土强度换算值,MPa,精确至0.1 MPa; $F_p$  为拔出代表值,kN,精确至

0.1 kN;  $\alpha$  为测强公式回归系数,  $10^3/\text{mm}^2$ ;  $\beta$  为测强公式回归系数, MPa.

采用最小二乘法原理<sup>[16]</sup>分别计算先装拔出法和后装拔出法的  $\alpha$   $\beta$  值, 解得先装法测强曲线中  $\alpha = 1.197 \times 10^3/\text{mm}^2$   $\beta = 23.677$  MPa, 后装拔出法测强曲线中  $\alpha = 0.90 \times 10^3/\text{mm}^2$   $\beta = 24.53$  MPa(测强曲线见图7、图8).

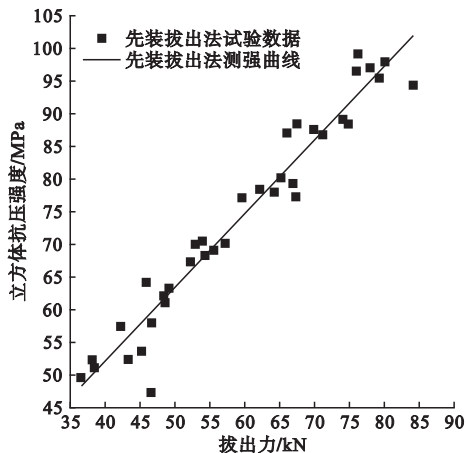


图7 先装拔出法测强曲线

Fig. 7 The strength curve of the pre-loading method

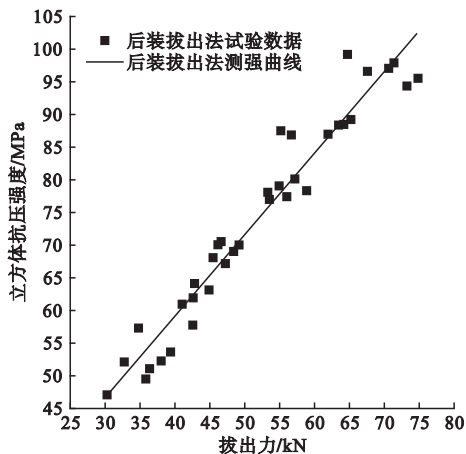


图8 后装拔出法测强曲线

Fig. 8 The strength curve of the post-loading method

采用相关系数  $r$ 、相对标准差  $e_r$ 、平均相对误差  $\delta$  对得到的拟合公式进行评价. 先装拔出法得到的相关系数  $r = 0.97 > 0.9$ , 表示拔出力与混凝土试件立方体抗压强度之间存在着良好的相关性; 相对标准差  $e_r =$

$6.25\% < 12\%$ , 符合规范要求<sup>[13]</sup>; 平均相对误差  $\delta = 3.93\%$ , 误差值较小, 表明测强曲线的精确程度较高; 对测强方程进行回归性检验<sup>[16]</sup>, 查  $F$  分布表可得  $F_{0.01}(m, n-k)$  的值 (其中  $m$  为回归方程自变量个数,  $n$  为样本容量,  $k$  为回归方程中系数个数), 经过计算可得  $F = 493.32 > F_{0.01}(1, 34) = 7.44$ , 说明回归方程在检验水平为  $\alpha = 0.01$  具有统计意义, 即认为先装拔出法拔出力与混凝土抗压强度之间线性关系良好.

后装拔出法得到的相关系数  $r = 0.97 > 0.9$ 、相对标准差  $e_r = 11.22\% < 12\%$ 、平均相对误差  $\delta = 4.18\%$ , 均符合规范要求<sup>[13]</sup>, 表明测强曲线有较高的精度. 对方程进行回归性检验, 可得  $F = 496.12 > F_{0.01}(1, 34) = 7.44$ , 认为后装拔出法拔出力与混凝土抗压强度之间线性关系良好.

#### (4) 钻芯法回归分析

根据文献<sup>[15]</sup>规定, 普通混凝土芯样的抗压强度相当于边长为 150 mm 立方体试件的混凝土抗压强度, 而对于高强自密实混凝土, 将试件立方体试件抗压强度与芯样抗压强度——对比进行回归分析, 回归曲线如下:

$$f_{\text{cu}}^c = \alpha_0 f_{\text{cu, cor}} + \alpha_1 \quad (6)$$

式中:  $f_{\text{cu}}^c$  为混凝土强度换算值, MPa, 精确至 0.1 MPa;  $\alpha_0$ 、 $\alpha_1$  为测强公式回归系数;  $f_{\text{cu, cor}}$  为芯样试件抗压强度值, MPa, 精确至 0.1 MPa.

利用最小二乘法求出  $\alpha_0$ 、 $\alpha_1$  值<sup>[16]</sup>, 其中  $\alpha_0 = 0.96$ ,  $\alpha_1 = 2.94$  (测强曲线见图9).

采用相关系数  $r$ 、相对标准差  $e_r$ 、平均相对误差  $\delta$  对得到的拟合公式进行评价. 相关系数  $r = 0.98 > 0.9$ , 说明芯样抗压强度和立方体试件抗压强度值有很好的线性关系; 相对标准差  $e_r = 4.8\% < 12\%$ , 平均相对误差  $\delta = 3.3\%$ , 说明回归曲线精确程度较高, 对测强方程进行回归性检验, 得  $F = 278.86 > F_{0.01}(1, 34) = 7.44$ , 认为钻芯法芯样抗压强度与混凝土抗压强度之间线性关系良好<sup>[16]</sup>.

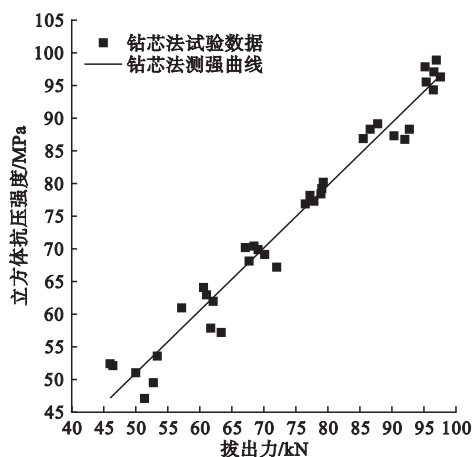


图9 钻芯法测强曲线

Fig. 9 The strength curve of core drilling method

### 3 不同检测方法试验结果对比分析

笔者采用相同的试验方法,针对高强度自密实混凝土采用回弹法、超声回弹综合法、先装拔出法、后装拔出法、钻芯法进行现场强度检测,并与滞留试件的立方体试件抗压强度值进行对比,得出相应测强公式,并进行误差分析,结果见表6。

表6 各种检测方法回归方程及误差分析

Table 6 The regression equations and error analysis of various detection methods

检测方法	测强公式	相关系数 $r$	平均相对误差 $e_r/\%$	相对标准差 $\delta/\%$
回弹法	$10.814 - 0.244R_m + 0.019R_m^2$	0.97	2.90	3.70
超声回弹综合法	$0.013R^{1.526}v^{-1.491}$	0.99	0.05	1.40
先装拔出法	$1.197F + 23.677$	0.97	3.93	6.25
后装拔出法	$0.90F + 24.53$	0.97	4.18	11.22
钻芯法	$0.96f_{cu,cor} + 2.94$	0.98	3.30	4.80

## 4 结论

(1)回弹法、超声回弹综合法作为常用的无损强度检测方法,依旧适用于高强自密实混凝土,且相关精度指标均满足相关规范的要求,超声回弹综合法测强公式精度更高,应优先采用。

(2)先装拔出法和后装拔出法检测高强自密实混凝土均能得出破坏状态良好的锥

面,且同样强度等级的试件先装拔出法锥面面积较大,两种方法精度均满足规范要求,且先装拔出法精度更高, $F$ 检验的结果证明两种方法的拔出力值均与混凝土试件抗压强度之间有良好的线性关系。

将回弹法、超声回弹综合法进行对比可知,超声回弹综合法测强曲线的平均相对误差、相对标准差均较低,分析原因是由于回弹法仅反映了混凝土表层状态,且受混凝土表面硬度影响较大,而超声回弹综合法通过测定声速反映了混凝土内部的密实程度,故精确程度更高,应优先采用。

当无损检测受限(回弹仪能量太低、超声仪引线太短等)而只能采用破损检测时,在三种破损检测方法中,钻芯法误差最小、精度最高,这是因为钻芯法直接钻取需检测部位的芯样进行抗压测试,较为直观地反应了混凝土内部的实际工作情况,且不受外界因素的影响,故应优先考虑。

将先装拔出法、后装拔出法进行对比可知,先装拔出法的平均相对误差、相对标准差均较后装拔出法低,这是由于先装拔出法是将锚固件直接固定于混凝土试件,而后装拔出法仍受锚固胶是否饱满、锚固件安放情况的影响,故误差较大。因此当受现场条件所限不便钻取芯样时,应优先采用先装拔出法。

(3)采用钻芯法检测高强自密实混凝土测强公式精度高于先装拔出法和后装拔出法, $F$ 检验的结果证明芯样的抗压强度与混凝土试件抗压强度之间有良好的线性关系,



故采用破损检测时,应优先使用钻芯法。

## 参考文献

- [1] 罗素蓉,吴文达,陈彪.二次受力下自密实混凝土加固 RC 梁受弯性能研究[J]. 工程力学,2015,32(4):62-68.  
(LUO Surong, WU Wenda, CHEN Biao. A study on flexural behavior of RC beams strengthened by self-compacting concrete under secondary load [J]. Engineering mechanics, 2015, 32(4):62-68.)
- [2] 肖林发,霍立飞,罗育民,等.自密实混凝土增大截面加固 RC 梁后可靠指标提高量分析[J]. 硅酸盐通报,2018,37(8):2385-2390.  
(XIAO Linfa, HUO Lifei, LUO Yumin, et al. Analysis on improvement of reliability index of RC beams after section-enlarging reinforcing with self-compact concrete [J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2018, 37(8):2385-2390.)
- [3] 吴爱芹. 浅谈自密实混凝土的发展[J]. 山西建筑,2009,35(16):168-169.  
(WU Aiqin. Discussion on self-compacting concrete development [J]. Shanxi architecture, 2009, 35(16):168-169.)
- [4] 程玉光,罗云华. 浅议结构实体混凝土强度检测的几种常用方法[J]. 建筑设计管理,2009,26(7):79-80.  
(CHENG Yuguang, LUO Yunhua. Discussion on several common methods for strength testing of structural solid concrete [J]. Architectural design management, 2009, 26(7):79-80.)
- [5] 袁书炜. C80 自密实混凝土配制研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2014.  
(YUAN Shuwei. Research on preparation of C80 self-compacting concrete [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2014.)
- [6] 吴德通. 高强自密实清水混凝土制备与性能及质量控制研究[D]. 南京:东南大学,2017.  
(WU Detong. Preparation performance and quality control study of high-strength self-compacting fair-faced concrete [D]. Nanjing: Southeast University, 2017.)
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 自密实混凝土应用技术规程:JGJ/T 283—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.  
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Self-compacting concrete application technical regulations: JGJ/T 283—2012 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2012.)
- [8] 中国工程建设标准化协会. 超声回弹综合法检测混凝土强度技术规程:CECS02—2005 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2005.  
(China Engineering Construction Standardization Association. Technical specification for testing concrete strength by ultrasonic rebound comprehensive method: CECS02—2005 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2005.)
- [9] 罗兴盛. 混凝土无损检测技术开发及应用研究[D]. 重庆:重庆大学,2008.  
(LUO Xingsheng. Development and application for non-destructive testing technology in concrete [D]. Chongqing: Chongqing University, 2008.)
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 回弹法检测混凝土抗压强度技术规程:JGJ/T 23—2011[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.  
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for rebound method for testing concrete compressive strength: JGJ/T 23—2011 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2011.)
- [11] 侯力凯. 河南地区回弹法检测混凝土强度测强曲线试验研究[D]. 郑州:郑州大学,2017.  
(HOU Likai. Research for testing curve of detecting the concrete compressive strength by rebound method in henan area [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2017.)
- [12] 卜良桃. 用于砂浆面层强度检测的锚固装置及其检测方法:CN201410254217. 5 [P]. 2014-09-03.  
(BU Liangtao. Anchoring device for detecting mortar surface strength and detecting method thereof. China. CN201410254217. 5 [P]. 2014-09-03.)
- [13] 中国工程建设标准化协会. 拔出法检测混凝土强度技术规程:CECS69—2011[S]. 北京:中国计划出版社,2011.  
(China Engineering Construction Standardization Association. Technical specification for the extraction of concrete strength by extraction method: CECS69—2011 [S]. Beijing: China Planning Press, 2011.)
- [14] 卜良桃,张琦. 高性能混凝土抗压强度现场检测方法[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2019,35(5):787-795.  
(BU Liangtao, ZHANG Qi. On-site detection method for high performance concrete compressive strength [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2019, 35(5):787-795.)
- [15] 中国工程建设标准化协会. 钻芯法检测混凝土强度技术规程:JGJ/T 384—2016[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.  
(China Engineering Construction Standardization Association. Technical specification for testing concrete strength by core drilling method: JGJ/T 384—2016 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2011.)
- [16] 曾金平. 数值计算方法[M]. 长沙:湖南大学出版社,2004.  
(ZENG Jinping. Numerical calculation method [M]. Changsha: Hunan University Press, 2004.)

(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)