

# 高性能混凝土抗压强度现场检测方法

卜良桃,张琦

(湖南大学土木工程学院,湖南长沙410082)

**摘要** 目的 研究回弹法、超声回弹综合法、先装拔出法、后装拔出法和钻芯法在高性能混凝土强度检测上的适用性. 方法 对5个强度等级C60、C70、C80、C90、C100的高性能混凝土试件分别进行5种现场检测方法试验,并进行同条件试块立方体抗压强度试验,根据试验结果进行拟合分析及误差分析. 结果 得到5种检测方法检测高性能混凝土强度的测强公式,其相关性与精确度均较理想,且钻芯法误差最小,回弹法误差最大. 结论 5种检测方法操作简便,均适用于高性能混凝土现场检测,可为工程实践提供依据.

**关键词** 高性能混凝土;检测方法;测强公式;拟合分析;误差

中图分类号 TU391

文献标志码 A

## On-site Detection Method for High Performance Concrete Compressive Strength

BU Liangtao, ZHANG Qi

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha, China, 410082)

**Abstract:** In order to study the applicability of rebound method, ultrasonic-rebound combined method, cast-in-place method, post-install method and drilled core method in high performance concrete strength testing, these five kinds of on-site detection methods were carried out on five high performance concrete specimens of C60, C70, C80, C90 and C100, and the compressive strength test of the same condition test block cube was carried out. The fitting analysis and error analysis were carried out according to the test data. As a result, the testing strength formulas of five methods for detecting the strength of high performance concrete are obtained, and the correlation and accuracy are ideal, the error of the drilled core method is the smallest, the rebound method is the largest. The above five methods are easy to operate and suitable for detecting on-site detection of high performance concrete, which can provide basis for engineering practice.

**Key words:** high performance concrete; detection method; testing strength formulas; fitting analysis; error

社会经济的发展和大规模基础设施建设的推行,催生了越来越多的新型材料、新型结构体系.高性能混凝土作为一种新型建筑材料,具有耐久性、强度高特点,被广泛应用于高层建筑结构、大跨度桥梁结构、抗震结构体系以及加固工程中<sup>[1-2]</sup>.随着高性能混凝土的应用与发展,为保证结构安全性,需对其进行现场检测.目前关于高性能混凝土检测标准只有《高强混凝土强度检测技术规程》(JGJ/T294—2013),测定材料抗压强度采用的是预留立方体试块进行抗压强度试验<sup>[3-4]</sup>,但立方体试块必须在混凝土浇筑成型时制作,制作后需要在特定条件下养护28 d后,再将立方体试块从工地现场运送到室内进行抗压强度试验,此过程较繁琐、存在试块损坏或遗失的风险.此外,若制作的试块不完备,或对已经施工完成的高性能混凝土结构强度存在质疑时,制作立方体试块不可能实现.因此,在现场工程应用中,需要一种可靠、准确、便捷、经济的方法对高性能混凝土进行现场检测<sup>[5-6]</sup>.然而国内的各种现场检测技术规程<sup>[7-11]</sup>只适用于强度等级50 MPa及以下的普通混凝土.因此笔者采用回弹法、超声回弹综合法、先装拔出法、后装拔出法、钻芯法5种现场检测方法分别对5个强度等级C60、C70、C80、C90、C100的混

凝土进行现场强度检测试验,5种检测方法均适用于检测高性能混凝土现场检测.

## 1 试验

### 1.1 试验材料及仪器设备

52.5级普通硅酸盐水泥;粒径5~20 mm的石灰岩碎石;细度模数3.0的中砂;硅灰;S95矿渣粉;I级粉煤灰;PCA聚羧酸系高性能减水剂;锚固胶;纯净水.

强制式搅拌机;标称动能4.5 J的HT450-A型高强回弹仪;多功能拔出法检测仪;非金属超声检测仪;钻芯机;恒压载压力试验机.

### 1.2 试验方案及试件制作

试验设计5个强度等级C60、C70、C80、C90、C100的混凝土试件,每个强度等级制作15个300 mm×300 mm×300 mm试件,用于5种检测方法试验;同时每个强度等级预留3组100 mm×100 mm×100 mm立方体试块,每组3个用于立方体抗压强度试验.

经过反复试配<sup>[12]</sup>,得到5个强度等级C60、C70、C80、C90、C100的高性能混凝土配合比(见表1).采用强制搅拌机搅拌,出料分层振捣,成型后置于养护池高温高湿养护7 d,随后自然养护21 d.

表1 高性能混凝土配合比

Table 1 Mix ratio of high performance concrete

强度等级	质量比								减水剂/%
	胶凝材料	水泥	硅灰	粉煤灰	矿粉	砂	石	水	
C60	1	0.80	—	—	0.20	1.58	2.03	0.33	0.3
C70	1	0.83	0.08	—	0.10	1.15	1.97	0.31	0.4
C80	1	0.72	0.08	—	0.20	1.05	1.96	0.27	0.5
C90	1	0.72	0.08	0.10	0.10	0.97	1.89	0.24	0.7
C100	1	0.67	0.13	0.10	0.10	1.23	1.66	0.23	0.8

### 1.3 回弹法试验

回弹法试验如图1所示,测区选取在每个回弹法试件浇筑面的4个侧面,测区规格200 mm×200 mm,在测区内横向4排、纵向4列均匀布置16个测点(见图1(a)).回弹

测试时,回弹仪击杆垂直于测试面,缓慢施压,快速复位读数(见图1(b)).每个测区内读取16个回弹值,去除3个最大值和3个最小值后,其平均值作为测区回弹平均值,测区数小于10个时,取各测区回弹平均值的最小

值作为该试件回弹代表值  $R_h^{[7]}$ .

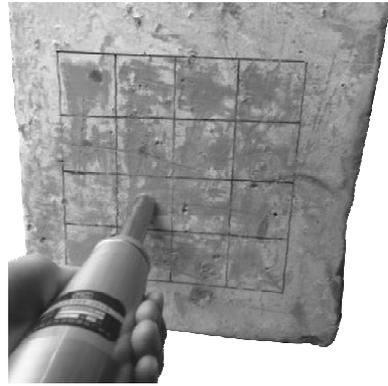
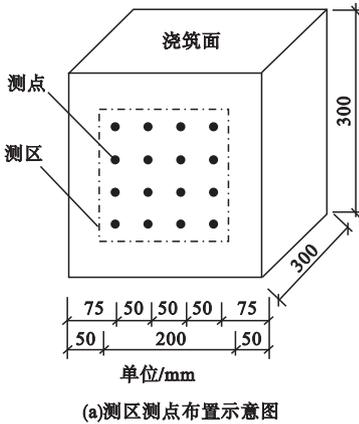


图1 回弹法试验

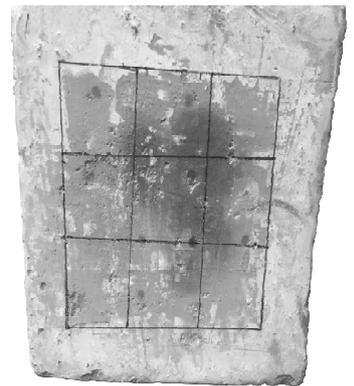
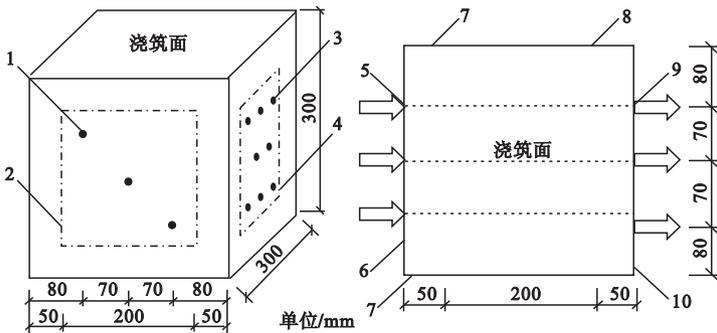
Fig.1 Rebound test

### 1.4 超声回弹综合法试验

超声回弹综合法试验如图2所示.将超声回弹综合法试件上下两面固定,取4个浇筑侧面作为超声回弹综合法测试区域.其中一对侧面作为超声法测区,作为发射换能器的发射点,另一测对应的位置即为接受换能器的接收点.由于采用的是对测法,试验过程中在两侧面上准确量测出发射点和接收点位

置,各3个点,并使其测距保持一致.另一对侧面作为回弹法测区,每个侧面布置8个测点.超声回弹综合法试件上的测点布置如图2(a)所示.

每个试件上,测得3个声速值  $v_1、v_2、v_3$ ,取平均值作为该试件的声速代表值  $v$ .测得的16个测点的回弹值处理后的平均值作为该试件的回弹代表值  $R_z^{[8]}$ .



1.声速测点;2.声速测区;3.回弹测点;4.回弹测区;5.发射点;  
6.超声发射面;7.回弹测试面;8.回弹测区;9.接收点;10.超声接收面。

(a)超声回弹综合法示意图

(b)超声回弹综合法试件

图2 超声回弹综合法试验

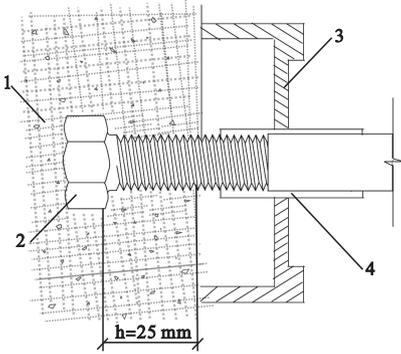
Fig.2 Ultrasonic-rebound combined test

### 1.5 先装拔出法试验

卜良桃等<sup>[13-15]</sup>针对拔出法检测技术做过大量试验研究,该检测技术已成功应用在薄层加固与实体、水泥砂浆、纤维水泥砂浆、活性粉末混凝土等材料中<sup>[2,16]</sup>.笔者借鉴相关测试技术,选用圆环支承式多功能强度检

测仪,锚固件选用4.8级碳钢制作,锚固深度定位  $h = 25 \text{ mm}$ ,试验条件的设定能获取较好的效果.浇筑各先装拔出法试件时,在其浇筑侧面模板上预先安装并固定锚固件,每个试件4个侧面各设置1个测点,任取3个作为测点,另一个作为备用.拆模后预留在试件

浇筑面侧面的锚固件能与测试面垂直(见图3(a));养护达到龄期后进行拔出试验(见图3(b));由于高性能混凝土材料密实性较好,各测点破坏时均呈现完整的倒圆锥形破坏体(见图3(c)). 每个试件测得3个极限拔出力,取其平均值作为该试件的先装拔出力代表值  $F_x$ .



1.高强混凝土;2.锚固件;3.反力支承圆环;4.拉杆。  
(a)先装拔出法示意图



(b)试验仪器



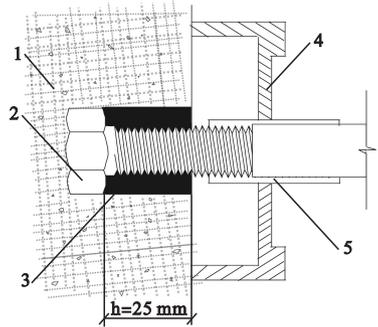
(c)先装拔出法破坏体

图3 先装拔出法试验

Fig. 3 Cast-in-place pullout test

### 1.6 后装拔出法试验

后装拔出法在试件养护完成后进行,在试件的侧面确定后装拔出4个测点,其中1个测点作为备用,用钻孔机钻取直径20 mm,深度30 mm的孔洞. 钻孔完成后用吹尘球清理孔内粉尘,并用沾有无水乙醇的小毛刷把孔洞清理干净,静置干燥后,用胶枪自孔内向孔口注胶,至结构胶注满整个孔内,安装锚固件,利用固定架固定锚固件并使锚固件垂直构件表面,在结构胶固化之后拆除固定架,随后进行拉拔试验(见图4(a)),并计算拔出力代表值  $F_h$ ,其破坏形态如图4(b)所示. 先装拔出法得到的破坏椎体比后装拔出法更完整.



1.高强混凝土;2.锚固件;3.锚固胶  
4.反力支承圆环;5.拉杆;h.锚固深度。

(a)后装拔出法示意图



(b)后装拔出法破坏体

图4 后装拔出法试验

Fig. 4 Post-install pullout test

### 1.7 钻芯法试验

将钻芯机固定在底座上,连接水阀,在被测试件侧面钻取芯样,匀速钻进. 钻取的芯样

按要求进行处理<sup>[11]</sup>. 每个试件钻取3个高径比为1.00直径100 mm的芯样,将处理好的芯样置于恒压载压力试验机进行压载,记录

芯样破坏荷载 $F$ ,计算芯样抗压强度值 $f_{\text{cor}}$ ,试件芯样抗压强度代表值 $f$ 由各组中得到的最小芯样抗压强度值确定<sup>[17]</sup>.



(a)钻取芯样



(b)芯样

图5 钻芯法试验

Fig. 5 Drilled core test

## 1.8 立方体抗压强度试验

立方体抗压强度试验装置采用微机控制加载压力试验机,将与试件同等养护条件下养护成型的100 mm立方体试块根据相关规范<sup>[18]</sup>试验方法加荷直至破坏得到抗压强度 $f_{\text{cc}}$ ,一组立方体试块确定立方体抗压强度值 $f_{\text{cu}}$ . 试验现象:随着压力的逐渐增大,立方体

试块产生竖向细密裂纹,直至混凝土脱落而破坏.

## 2 试验结果与分析

### 2.1 试验结果

通过试验得到每一种检测方法对应的代表值与立方体抗压强度值(见表2).

表2 不同检测方法的试验结果

Table 2 Experimental data of different testing methods

强度等级	$R_h$	$R_z$	$v/( \text{km} \cdot \text{s}^{-1} )$	$F_x/\text{kN}$	$F_h/\text{kN}$	$f/\text{MPa}$	$f_{\text{cu}}/\text{MPa}$
C60	54.5	55.1	4.32	20.74	25.49	58.47	57.11
	53.8	54.2	4.23	19.12	24.45	55.41	54.88
	54.9	54.9	4.25	19.45	25.67	57.15	57.22
C70	60.7	60.5	4.43	35.14	31.25	68.45	67.38
	61.2	60.1	4.39	32.45	33.42	67.15	66.64
	59.7	59.7	4.41	33.42	32.48	66.14	67.64
C80	64.9	65.3	4.63	44.36	38.45	75.25	78.79
	65.2	64.6	4.61	46.54	39.15	76.78	76.69
	66.4	66.4	4.65	44.25	40.25	79.15	77.56
C90	69.6	68.1	4.88	54.16	44.41	83.14	85.89
	68.1	69.2	4.82	56.17	48.45	84.24	84.90
	70.5	70.1	4.86	50.63	46.74	86.45	85.83
C100	74.4	74.4	4.98	61.91	53.12	91.45	93.02
	73.2	73.1	4.96	63.14	52.12	96.74	95.83
	72.3	72.6	5.02	58.98	50.14	94.12	93.57

### 2.2 测强曲线的建立

回弹法检测高性能混凝土测强曲线的数学模型选用二项式数学公式:

$$f_{\text{cu},1}^c = a + bR_h + cR_h^2. \quad (1)$$

式中: $f_{\text{cu},1}^c$ 为高性能混凝土回弹法强度换算值,MPa; $a$ 、 $b$ 、 $c$ 为回归系数.

利用所获得的试验数据和计算分析软件得到回弹法测强曲线如图6所示,回弹法检测高性能混凝土测强公式:

$$f_{cu,1}^c = -26.16751 + 1.17071 R_h + 0.00633R_h^2. \quad (2)$$

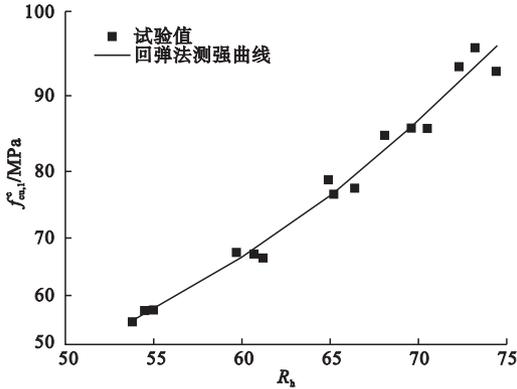


图6 回弹法测强曲线

Fig. 6 Strength curve of rebound method

超声回弹综合法是综合考虑声速值和回弹值,故检测高性能混凝土测强曲线的数学模型选用幂函数数学模型:

$$f_{cu,2}^c = aR_z^b v^c. \quad (3)$$

式中: $f_{cu,2}^c$ 为高性能混凝土超声回弹综合法测强换算值,MPa; $a$ 、 $b$ 、 $c$ 为回归系数.

拟合得声速-回弹值-强度值测强曲面如图7所示.

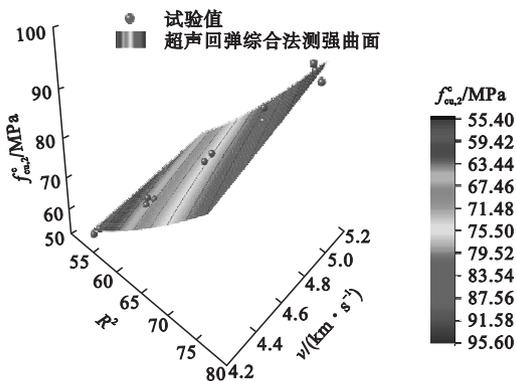


图7 超声回弹综合法测强曲面

Fig. 7 Strength curve of ultrasonic-rebound combined method

超声回弹综合法检测高性能混凝土的测强公式:

$$f_{cu,2}^c = 0.1168R_z^{1.2499} v^{0.8251}. \quad (4)$$

应用最小二乘法原理对先装拔出法、后装拔出法测得的拔出力代表值与立方体抗压强度代表值进行回归分析,参照拔出法检测混凝土及砂浆强度的推定公式<sup>[10]</sup>,选用的数学模型:

$$f_{cu}^c = aF + b. \quad (5)$$

式中: $f_{cu}^c$ 为高性能混凝土强度换算值,MPa; $F$ 为拔出力代表值,kN; $a$ 、 $b$ 为回归系数.

根据拔出力代表值和立方体抗压强度代表值拟合得先装拔出法、后装拔出法测强曲线如图8、图9所示,测强公式:

$$f_{cu,3}^c = 0.89397F_x + 38.02669, \quad (6)$$

$$f_{cu,4}^c = 1.37285F_h + 22.60134. \quad (7)$$

式中: $f_{cu,3}^c$ 为高性能混凝土先装拔出法强度换算值,MPa; $f_{cu,4}^c$ 为高性能混凝土后装拔出法强度换算值,MPa.

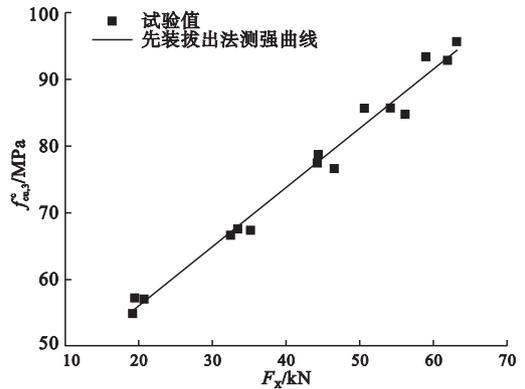


图8 先装拔出法测强曲线

Fig. 8 Strength curve of cast-in-place pullout method

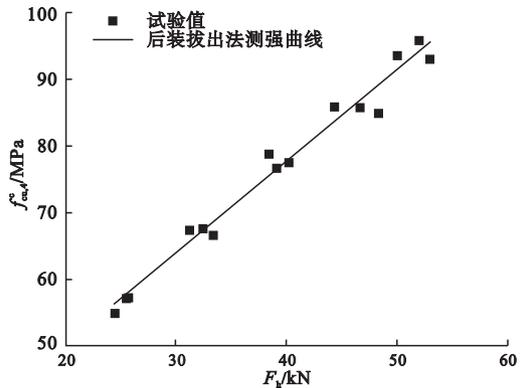


图9 后装拔出法测强曲线

Fig. 9 Strength curve of post-install pullout method

钻芯法检测高性能混凝土测强曲线选用的数学模型<sup>[11]</sup>:

$$f_{cu,5}^c = af^b \quad (8)$$

式中: $f_{cu,5}^c$ 为高性能混凝土钻芯法强度换算值,MPa; $a$ 、 $b$ 为回归系数。

应用芯样抗压值和立方体抗压强度代表值进行拟合分析得到钻芯法测强曲线如图10所示,测强公式:

$$f_{cu,5}^c = 0.963\ 02f^{1.009\ 27} \quad (9)$$

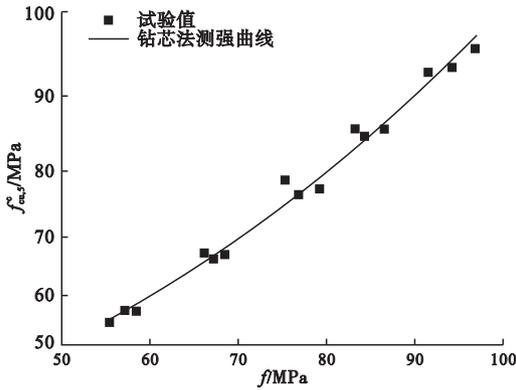


图10 钻芯法测强曲线

Fig. 10 Strength curve of drilled core method

### 2.3 计算误差分析

根据皮尔生相关系数  $r$  判断试验数据的离散程度,采用回归曲线的平均相对误差和相对标准差两个指标值的大小来对回归曲线的计算精度进行对比验证<sup>[19-21]</sup>,其中平均相对误差与相对标准差的计算式分别为

$$\delta = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \left[ \left| \frac{f_i}{f_{cu,i}} - 1 \right| \right] \times 100\% \quad (10)$$

$$e_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{f_i}{f_{cu,i}} - 1 \right)^2}{n - 1}} \times 100\% \quad (11)$$

式中: $e_r$ 为相对标准差; $\delta$ 为平均相对误差; $f_i$ 为第  $i$  个立方体试块抗压强度实测强度,MPa; $f_{cu,i}$ 为测强曲线公式计算的抗压强度计算强度,MPa; $n$ 为建立回归方程的试件组数。

5种检测方法测强公式的相关参数如表3所示。由表3可知,5种检测方法的测强公式都具有较高的相关系数  $r$  值,均接近1。说

明高性能混凝土的回弹值、拔出力与抗压强度之间存在良好关系;同时,得到的平均相对误差均小于6%,说明方程的预测能力较强,与实际情况偏离较小;相对标准差是衡量拟合方程所揭示的规律性强弱的参数,高性能混凝土的5种检测方法的  $e_r$  均小于12%,表明采用5种检测方法的测强公式误差较小,5种检测方法均可用检测高性能混凝土抗压强度。

表3 5种检测方法下测强公式的相关参数

Table 3 Related parameters of testing strength formulas for five detection methods

检测方法	相关系数 $r$	$\delta/\%$	$e_r/\%$
回弹法	0.991	1.82	2.21
超声回弹综合法	0.993	1.76	2.14
先装拔出法	0.991	1.75	2.29
后装拔出法	0.989	2.08	2.55
钻芯法	0.994	1.55	1.95

5种检测方法不同强度等级的误差  $\varepsilon$  为

$$\varepsilon = \frac{f_{cu,i} - f_i}{f_i} \quad (12)$$

5种检测方法试验结果误差分析如图11所示。由图可知,5种检测方法曲线的计算强度相对于实测强度的误差都在  $-10\% \sim 10\%$ ,且随着强度的增大,误差由正误差向负误差发展,误差分布越来越分散。

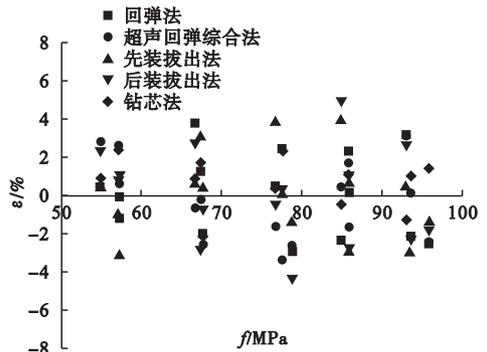


图11 5种检测方法试验数据误差分析

Fig. 11 Error analysis chart of test data for five detection methods

## 3 5种检测方法试验结果对比

笔者对高性能混凝土进行回弹法、超声

回弹综合法、先装拔出法、后装拔出法、钻芯法现场检测试验,高性能混凝土强度共设置了5个强度等级 C60、C70、C80、C90、C100,拟合出5种检测方法测强曲线。

钻芯法表现出较高的相关性以及误差最小,说明钻芯法能更好地反映立方体实际强度;而且离散性较小,精确度较高。这主要是由于钻芯法所取的芯样反映的是结构实体内部的混凝土原有现状,不受试件表面及其他外界因素的影响。其测试方法是直接进行抗压测试试验,测试结果较为直接,是一种直接的测试方法<sup>[17]</sup>。

除钻芯法外的其他方法均是间接检测方法,其中回弹法误差最大。回弹法测强曲线是二次曲线,斜率及相对误差随着强度的增大而增大,这主要是由于回弹法测试的是混凝土表面强度,回弹值受表面现状及局部细微缺陷影响<sup>[3]</sup>。

超声回弹综合法采用双指标推定混凝土强度,其声速值随着强度的增大而增大,精度比回弹法的测强曲线高,误差比回弹法的测强曲线小,是由于超声回弹综合法测试了混凝土回弹值、声速值两个指标,回弹值反映混凝土表层状态,声速值反映混凝土内部的密实度,更好地内外结合,进一步弥补回弹法单一指标法的不足,提高超声回弹综合法的精度。

先装拔出法以及后装拔出法测强曲线是一次直线,高性能混凝土的实际抗压强度与先装拔出力、后装拔出力存在良好的线性关系,先装拔出力略大于后装拔出力,且拔出力随着强度的增大而增大。但先装拔出法的精度比后装拔出法精度高,由于先装拔出法测点周边结构材料比较密实,而后装拔出法由于注胶的饱满度,以及安放锚固件的垂直度等因素影响,容易出现较大的误差,在文献[14]中的试验结果也反映了这一点。

## 4 结论

(1)通过回弹法、超声回弹综合法、先装

拔出法、后装拔出法、钻芯法在高性能混凝土实体上进行的强度检测,得出相关试验数据,拟合得到5种检测方法测强公式,其相关性与精确度均较理想,且钻芯法误差最小,回弹法误差最大。

(2)回弹法、超声回弹综合法、先装拔出法、后装拔出法、钻芯法均可运用在高性能混凝土实体的强度检测,检测精度高,试验操作方便,可为工程实践提供依据。

## 参考文献

- [1] 黄士元. 高性能混凝土发展的回顾与思考[J]. 混凝土, 2003(7): 3-9.  
(HUANG Shiyuan. The reflection of high performance concrete development [J]. Concrete, 2003(7): 3-9.)
- [2] 卜良桃, 苏丽静, 张琦. 锚固深度对拔出法检测活性粉末混凝土强度影响的试验研究[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(9): 284-289.  
(BU Liangtao, SU Lijing, ZHANG Qi. Experimental study of anchorage depth on strength of reactive powder concrete by pull out method [J]. Science technology and engineering, 2018, 18(9): 284-289.)
- [3] 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 of nondestructive testing technology for concrete[D]. Chongqing: Chongqing University, 2008.)
- [4] 江丰, 陈健. 加强混凝土工程强度评定的管理[J]. 重庆建筑, 2003(1): 43-44.  
(JIANG Feng, CHEN Jian. Strengthening the management of concrete engineering strength evaluation [J]. Chongqing architecture, 2003(1): 43-44.)
- [5] 朱跃武, 刘文竞, 周宇翔, 等. 回弹法检测高强混凝土抗压强度[J]. 施工技术, 2013(增刊1): 179-182.  
(ZHU Yuewu, LIU Wenjing, ZHOU Yuxiang, et al. Determination of compressive strength of High strength concrete by rebound method [J]. Construction technique, 2013(S1): 179-182.)
- [6] MORI K, SPAGNOLI A, MURAKAMI Y, et al. A new non-contacting non-destructive testing method for defect detection in concrete [J]. Ndt & E international, 2002, 35(6): 399-406.
- [7] 中华人民共和国建设部. 回弹法检测混凝土抗压强度技术规程: JGJ/T23—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.  
(Ministry of Construction of the People's Republic of China. Technical specification for inspecting of concrete compressive strength by

- rebound method; JGJ/T23—2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.)
- [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; CECS 02:2005 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.  
(China Association for Engineering Construction Standardization. Technical specification for detecting strength of concrete by ultrasonic-rebound combined method; CECS 02:2005 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.)
- [9] 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; CECS 69:2011 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2011.  
(China Association for Engineering Construction Standardization. Technical specification for test of concrete strength by pullout method; CECS 69:2011 [S]. Beijing: China Plans Publishing House, 2011.)
- [10] 中国工程建设标准化协会. 拔出法检测水泥砂浆和纤维水泥砂浆强度技术规程; CECS 389:2014 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.  
(China Association for Engineering Construction Standardization. Technical specification for inspection of strength cement mortar and fiber reinforced cement mortar by pullout method; CECS 389:2014 [S]. Beijing: China Plans Publishing House, 2015.)
- [11] 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, 2016.  
(China Association for Engineering Construction Standardization. Technical specification for testing concrete strength with drilled core method; JGJ/T384—2016 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.)
- [12] KWAN A, CAI Y, CHEUNG Y, et al. High performance grade 75 - 80 concrete for in-situ construction in Hong Kong [J]. Transactions of the Hong Kong institution of engineers, 1994, 1 (2): 29 - 36.
- [13] 卜良桃. 建筑材料检测 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.  
(BU Liangtao. Building material testing [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.)
- [14] 卜良桃, 侯琦. 先装拔出法检测水泥砂浆薄层强度现场试验研究 [J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 2015, 42(5): 53 - 57.  
(BU Liangtao, HOU Qi. Field test research on strength of cement mortar thin layer detected by cast-in-place pullout method [J]. Journal of hunan university (natural science), 2015, 42 (5): 53 - 57)
- [15] 卜良桃, 李静媛. 后装拔出法检测聚乙烯醇纤维水泥复合砂浆抗压强度的试验 [J]. 沈阳建筑大学学报 (自然科学版), 2010, 26(2): 211 - 215.  
(BU Liangtao, LI Jingyuan. Experimental research on polyvinyl alcohol-engineered cementitious composite mortar by pull-out post [J]. Journal of shenyang jianzhu university (natural science), 2010, 26(2): 211 - 215.)
- [16] 何瑶. 后装拔出法检测加固砖砌体钢筋网水泥砂浆抗压强度试验研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2012.  
(HE Yao. Standard research on detecting the strength of cement mortar by pull-out post-insert method [D]. ChangSha: Hunan University, 2012.)
- [17] 李珂. 商品混凝土强度非破损检测方法的研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2002.  
(LI Ke. Study on Non-destructive testing method for strength of Commercial concrete [D]. ZhengZhou: Zhengzhou University, 2002.)
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土力学性能试验方法标准; GB/T 50081—2002 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.  
(Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the people's Republic of China. Standard test method for plain concrete mechanical properties; GB/T 50081—2002 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003.)
- [19] 邱平. 建筑工程结构检测数据的处理 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.  
(QIU Ping. Data processing of structural testing in building engineering [M]. Beijing: China Environmental Press, 2002.)
- [20] 黄政宇, 李仕根. 含粗骨料超高性能混凝土力学性能研究 [J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 2018, 45(3): 47 - 54.  
(HUANG Zhengyu, LI Shigen. Study on mechanical properties of ultra high performance concrete with coarse aggregate [J]. Journal of Hunan university (natural science) 2018, 45 (3): 47 - 54.)
- [21] 来庆辉. 高性能混凝土抗压强度无损检测技术试验研究 [D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2017.  
(LAI Qinghui. Experimental study on nondestructive testing technology of compressive strength of high performance concrete [D]. Harbin: Heilongjiang: Heilongjiang University, 2017.)  
(责任编辑: 徐玉梅 英文审校: 唐玉兰)