

# 超高性能混凝土构件强度检测方法探究

周健

广东省深圳市南山区桃源街道深圳大学城哈尔滨工业大学校区

DOI:10.32629/bd.v9i6.4531

**[摘要]** 超高性能混凝土(UHPC)具有超高强度特性,在建筑领域应用越发广泛,其构件强度的检测方法方面研究报道尚少。针对以上问题,作者结合国家标准规范和学者研究成果,对比分析局部破损检测法和无损检测法,探究不同方法的优缺点和适用性,为超高性能混凝土的强度检测探究一条切实可行的思路 and 方向。研究表明,取芯法是目前最为直观、可靠且高效的强度检测方法;后装拔出法需结合前期得到的测强曲线和测强公式开展专项的强度检测,局限性较大。

**[关键词]** 超高性能混凝土; 取芯法; 拔出法; 回弹法; 超声回弹综合法

中图分类号: TU528 文献标识码: A

## Exploration of Strength Testing Methods for Ultra-High Performance Concrete Components

Jian Zhou

Harbin Institute of Technology Campus, Shenzhen University Town, Taoyuan Street, Nanshan District, Shenzhen, Guangdong Province

**[Abstract]** Ultra-high performance concrete (UHPC) possesses ultra-high strength characteristics and is increasingly widely used in the construction field. However, there are few research reports on strength testing methods for its components. To address this issue, based on national standards and specifications as well as research findings from scholars, the author compares and analyzes local damage testing methods and non-destructive testing methods, exploring the advantages, disadvantages, and applicability of different methods, providing a practical and feasible approach and direction for strength testing of ultra-high performance concrete. Research shows that the core drilling method is currently the most intuitive, reliable, and efficient strength testing method. The post-installed pull-out method requires special strength testing based on previously obtained strength calibration curves and formulas, with significant limitations.

**[Key words]** ultra-high performance concrete; core drilling method; pull-out method; rebound method; ultrasonic-rebound combined method

## 引言

混凝土构件质量检验主要检测项目是混凝土强度和内部缺陷<sup>[1]</sup>。随着超高性能混凝土的应用与发展,如何有效对其强度进行现场检测成为重点关注。混凝土结构强度测定最常见方法是预留混凝土立方体试块,但若制备的试块不完备或对已完成施工的超高性能混凝土结构强度存疑时,亟需一种可靠、准确、便捷、经济的方法开展现场检测,为工程质量验收提供依据。

基于学者开展的混凝土结构强度测定方法探究,发现适于UHPC的结构强度检测方法;研究发现以无损检测技术和局部破损检测技术相结合形成了一个比较完整的混凝土检测体系。

## 1 局部破损检测法

### 1.1 取芯法

《混凝土强度检验评定标准》(GB/T50107-2010)中规定“当对混凝土试件的代表性有怀疑时,可用从结构中钻取试样的方法或采用非破损检验方法,按有关标准的规定对结构或构件中混凝土的强度进行推定”,取芯试样是直接从结构或构件上钻取芯样,通过试验强度推定混凝土的实际强度。学者将成果形成了《钻芯法检测混凝土强度技术规程》(JGJ/T 384-2016)<sup>[2]</sup>,测定围为10~100MPa。芯样强度试验应符合《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081)的规定;芯样试件的抗压强度值可按式(1)计算。

$$f_{cu,cor} = \beta_c F_c / A_c \quad (1)$$

检验批混凝土强度的推定值按照式(2、3、4、5)计算推定,并按照工程场景进行修正调整,修正量按照式(6、7)计算得到。

$$f_{cu,e1} = f_{cu,cor,m} - k_1 S_{cu} \quad (2)$$

$$f_{cu,e2} = f_{cu,cor,m} - k_2 s_{cu} \quad (3)$$

$$f_{cu,cor,m} = (\sum_{i=1}^n f_{cu,cor,i}) / n \quad (4)$$

$$s_{cu} = (\sum_{i=1}^n (f_{cu,cor,i} - f_{cu,cor,m})^2 / (n - 1))^{1/2} \quad (5)$$

$$f_{cu,i0}^c = f_{cu,i}^c + \Delta_f \quad (6)$$

$$\Delta_f = f_{cu,cor,m} - f_{cu,mj}^c \quad (7)$$

芯样试件的劈裂抗拉强度值可按式(8)计算。

$$f_{t,cor} = 0.637\beta_f f_{t,i} A_t \quad (8)$$

检验批的混凝土劈裂抗拉强度推定值按式(9、10、11和12)

计算得到。

$$f_{t,e1} = f_{t,cor,m} - k_1 s_t \quad (9)$$

$$f_{t,e2} = f_{t,cor,m} - k_2 s_t \quad (10)$$

$$f_{t,cor,m} = (\sum_{i=1}^n f_{t,cor,i}) / n \quad (11)$$

$$s_t = (\sum_{i=1}^n (f_{t,cor,i} - f_{t,cor,m})^2 / (n - 1))^{1/2} \quad (12)$$

取芯法是一种直观、精度高的检测手段,可直接反映建筑结构的混凝土强度情况,为现场结构测定提供坚实的数据基础。

### 1.2 拔出法

拔出法<sup>[3]</sup>通过拉拔埋置在混凝土中的锚固件所需的拔出力来推算材料强度,拔出力与混凝土材料抗拉强度之间有良好的线性关系。浙江大学金南国教授<sup>[4]</sup>、山东省建筑科学院崔士起<sup>[5]</sup>、布毅<sup>[6]</sup>开展了系列研究;湖南大学卜良桃教授基于超高性能混凝土开展了系列拔出法强度测定研究<sup>[7]</sup>,系统地开展了先装、后装拔出试验和立方体试块抗压强度试验,建立测强曲线,得出测强公式,技术越发成熟。

表1 后装法测强公式

锚固深度 h/(mm)	拟合方程
20	$\int_{cu}^c = 10.77 \cdot F - 132.60$
25	$\int_{cu}^c = 7.12 \cdot F - 57.10$
30	$\int_{cu}^c = 4.51 \cdot F - 4.10$
35	$\int_{cu}^c = 3.96 \cdot F - 11.32$
40	$\int_{cu}^c = 3.21 \cdot F - 3.95$

在本节中卜良桃教授<sup>[8]</sup>针对强度等级为120~180MPa的UHPC,设计了20mm、25mm、30mm、35mm和40mm五种锚固深度,首次对UHPC后装拔出法检测不同强度、不同锚固深度的综合研究,研究采用ZH-60检测仪。后装拔出法每组包括一个1000mm×450mm×120mm

试件及3个立方体试块。

试件呈现“喇叭型”倒锥形破坏模式。在同等混凝土强度等级下,锚固深度越深,拔出力越大,破坏椎体越大;在相同锚固深度条件下,混凝土强度等级越高,得到的破坏椎体越小、拔出力越大。

经分析得到初步测强曲线,修正得到表1测强公式,用以检测强度。

通过文献查阅,给出表2中现有研究后装拔出法检测混凝土、水泥砂浆和钢纤维水泥砂浆的测强公式。通过对比h=30mm的测强曲线斜率,说明试验结果与学者研究基本相符,试验结果合理。

表2 不同材料的后装法测强公式

材料类型	测强公式	锚固深度 h/(mm)	强度等级
水泥砂浆	$\int_{cu}^c = 4.90 \cdot F - 20.35$	30	M10-M50
混凝土	$\int_{cu}^c = 1.55 \cdot F + 2.35$	25	C80以下
钢纤维水泥砂浆	$\int_{cu}^c = 4.37 \cdot F - 19.30$	30	M20-M100

研究表明,后装拔出法对UHPC的结构强度测定有良好的适用性,操作简便;该方法有微破损性,检测操作时限短,检测后修复较为简便,对原结构几乎无损伤;可根据不同区域、强度等因素建立专项测强曲线,审定后用于强度测定和评估。

## 2 无损检测法

无损检测技术是在不破坏结构构件的情况下利用测量仪器获取有关混凝土质量而无损于混凝土受力功能的物理量,以该物理量与混凝土质量(强度、混凝土缺陷)之间的关系去推定混凝土质量(强度、混凝土缺陷)。

### 2.1 回弹法

回弹法是通过测试混凝土表面硬度来推定混凝土强度。随着混凝土强度增加其检测的准确性降低,本质是因为表面硬度与整体强度的相关性减弱;同时,其结果受到混凝土配合比、养护龄期和方法、表面平整程度、测试现场温湿度、表面碳化情况、组分硬度及仪器情况的影响<sup>[9]</sup>;因此,回弹法呈现了“用之不准,弃之不可”的情况。

学者研究形成《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》(JGJ/T23-2001)<sup>[10]</sup>,检测范围为10.0~60MPa。在工程实践中,已经实现110MPa高强混凝土的回弹法检测。

超高性能混凝土的材料特性和破坏机制与回弹法所依赖的基本原理和校准体系完全不符,导致回弹法测定结果完全失真,毫无实践价值;其本质是在超高区间中“表面硬度”和“内部强度”的关联断裂,不再是线性或可预测的。UHPC强度通常在120MPa以上,甚至可达200~300MPa,远超出回弹法经验公式的有效范围。UHPC因其高温蒸汽养护的特点,出现了表面硬度增长远远跟不上内部抗压强度增长的情况,因此若是采用回弹法测出

表面硬度值,套用基于普通混凝土建立的“硬度-强度”曲线,得到的“换算强度”会远远低于UHPC的真实抗压强度,可能只有真实的二分之一甚至更低,引发误判。

### 2.2 超声回弹综合法

超声回弹综合法是结构无损检测中用于推定混凝土强度的常用方法。超声波检测设备简单,操作简便,长期以来广泛用于混凝土缺陷检测<sup>[11]</sup>。超声波易受到横向尺寸效应、现场环境、混凝土内部钢筋等与混凝土性能无关紧要的因素影响。《超声回弹综合法检测混凝土抗压强度技术规程》(T/CECS 02-2020)<sup>[12]</sup>中探讨了超声回弹综合法在混凝土强度检测中的应用,适用混凝土抗压强度为10MPa~70MPa。

规程针对测定区域开展回弹测试和超声测试得到相应的数值,推定混凝土抗压强度。以全国测强曲线推定为例,混凝土抗压强度可按照式(13)计算。

$$f_{cu,i} = 0.0286v_{ai}^{1.999} R_{ai}^{1.155} \quad (13)$$

在混凝土芯样修正时,芯样数量不应少于4个,公称直径宜为100mm,高径比为1;测区混凝土抗压强度修正值及测区混凝土抗压强度换算值应按式(14~18)计算。

$$\Delta_{tot} = f_{cor,m} - f_{cu,m0} \quad (14)$$

$$\Delta_{tot} = f_{cu,m} - f_{cu,m0} \quad (15)$$

$$f_{cor,m} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{cor,i} \quad (16)$$

$$f_{cu,m} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{cu,i} \quad (17)$$

$$f_{cu,m0} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{cu,i} \quad (18)$$

测区混凝土抗压强度换算值按式(19)计算。

$$f_{cu,i1} = f_{cu,i0} + \Delta_{tot} \quad (19)$$

构件混凝土抗压强度推定值,在测区数少于10个时按式(20)计算,在测区数不少于10或按批量检测时按式(21、22、23)计算。

$$f_{cu,e} = f_{cu,min} \quad (20)$$

$$f_{cu,e} = m_{fcu} - 1.645s_{fcu} \quad (21)$$

$$m_{fcu} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{cu,i} \quad (22)$$

$$s_{fcu} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_{cu,i}^2) - n(m_{fcu})^2}{n-1}} \quad (23)$$

专项特殊检测事件可建立专属测量曲线以更准确地开展强度测定工作。刘汉勇等使用高强混凝土回弹仪(标准能量4.50J),按照超声回弹综合法对瓯越大桥的海工混凝土承台、墩柱开展混凝土强度现场检测<sup>[13]</sup>;得到瓯越大桥专用测强曲线,如式(24)所示。

$$\int_{cu}^c = 1.436(v-4.341)^{0.361}(R+44.439)^{0.873} \quad (24)$$

学者研究集中在普通混凝土及高强混凝土的强度检测,针对超高性能混凝土的强度检测尚少,需要进一步开展系统研究工作。

### 3 结论

本文探究学者对混凝土强度的检测,分析检测手段和措施,明确检测方法优缺点和适用性。

(1)UHPC构件强度检测须采用直接、可靠的方法。取芯法是评估结构实体最可靠的微损现场方法,直观反映建筑结构混凝土强度。

(2)后装拔出法在UHPC构件强度检测方面有好的适用性,需建立专属测强曲线和测强公式,对现场检测有重要意义。

(3)单一回弹法不可用,可结合超声波波速进行综合判断。对特定UHPC需建立“回弹值-超声波速-抗压强度”三元关系曲线,不具有普适性。

### [参考文献]

[1]林维正.混凝土超声检测的进展[J].无损检测,2002(10):428-431.

[2]JGJ/T384-2016.钻芯法检测混凝土强度技术规程[S].北京:中国建筑工业出版社,2016.

[3]Richards O. Pullout Strength of Concrete[J].1977:161-176.

[4]金南国,金贤玉.胶粘拔出法检测混凝土强度新技术研究.建筑技术,2003(01):58-59.

[5]崔士起,石磊,王金山等.有约束后锚固拔出法试验受力机理及回归曲线分析.建筑结构,2009,39(03):95-98.

[6]布毅.后植筋拔出法检测混凝土强度技术研究[D].湖南大学,2013.

[7]苏丽静.拔出法检测超高性能混凝土抗压强度试验研究[D].湖南大学,2018.

[8]卜良桃,刘婵娟.基于拔出法的超高强混凝土强度检测试验[J].淮海大学学报(自然科学版),2017,45(04):304-308.

[9]Mehta P K, Monteiro P J M. Concrete: microstructure, properties, and materials[M]. New York: McGraw-Hill, 2006.

[10]JGJ/T 23-2011,回弹法检测混凝土抗压强度技术规程,北京,中国建筑工业出版社,2011.

[11]顾轶东,林维正,苏航.冲击回波法在混凝土无损检测中的应用[J].无损检测,2004,(09):468-470.

[12]T/CECS02-2020.超声回弹综合法检测混凝土抗压强度技术规程[S].北京:中国计划出版社,2020.

[13]刘汉勇,赵尚传,江力财.瓯越大桥混凝土超声回弹综合法专用测强曲线[J].中南大学学报:自然科学版,2016,47(5).