

# 基于冲击弹性波的水泥水化趋势分析研究

邓立,张远军

(四川升拓检测技术股份有限公司,成都 610045)

**摘要:**水泥的水化过程是一个非常复杂的化学物理过程,水化反应进行的程度会直接影响混凝土结构的性能,一直是科研工作者研究的重点。水泥水化程度是指一定时间内水泥水化量与水泥完全水化量之比。采用基于冲击弹性波的方法对20世纪90年代的混凝土大坝芯样进行弹性波波速测试,并对芯样进行抗压试验,同时调研国内外相关资料,结果表明该混凝土经过长时间的水化反应导致其抗压强度与设计相比,都有很大的增长。因此,经过研究提出通过对混凝土芯样弹性波波速测试,可间接判断混凝土中水泥水化反应情况,为跟踪混凝土内水化反应提供了宏观手段。

**关键词:**水化反应;冲击弹性波;波速

**中图分类号:**TU4

**文献标志码:**A

## 引言

混凝土作为土木工程中用量最大、用途最广的一种建筑材料,在结构的安全、可靠性和耐久性方面起绝对的作用,因此,对混凝土质量的研究与控制是非常重要的。

一般混凝土在水泥配比拌合以后,水将水泥颗粒包裹,水泥表面的矿物成分将与水发生相关水化反应<sup>[1]</sup>,并产生水化热<sup>[2]</sup>。水化反应的快慢程度决定混凝土早期强度,同时也影响混凝土早期水化热的强弱。

水泥混凝土的各项性能的发展均是基于水泥水化过程开始的,水化机制直接影响水化速率,并影响着混凝土的各项物理力学性能的发展。相关研究表明<sup>[3]</sup>,对混凝土结构的强度指标测试可评定混凝土的抗破坏性能。

近年来,冲击-回波无损检测技术在混凝土无损检测中扮演着重要角色。在水工混凝土结构检测应用中,

冲击弹性波(P波)波速被普遍用于评定混凝土的质量、强度及内部缺陷等。吴家晔等在弹性波方面的研究表明,弹性波波速与混凝土的强度及弹性模量之间存在一定的关系<sup>[4,5]</sup>,但不同弹性波波速所对应的混凝土强度关系不尽相同。

本文在综合目前常用混凝土检测技术的基础上,提出了采用冲击弹性波的波速分析评定混凝土结构在不同时期的抗破坏性能,同时可以分析水泥水化作用过程对混凝土性能的影响趋势,为进一步研究28天后混凝土强度的变化趋势提供依据。

## 1 水泥水化反应

水泥的水化反应是指水泥中各组分物质与水所起的化合作用,及各物质从无水状态转变为含结合水状态的反应过程,其包含水解和水合反应两个阶段。水化反应过程极其复杂,反应数目众多,各个反应可以大致分为化学反应和物理化学反应两种。

收稿日期:2017-06-19

基金项目:四川省科技厅项目(2016GFW0137)

作者简介:邓立(1992-),男,四川中江人,助理工程师,主要从事冲击弹性波无损检测方面的研究,(E-mail)1036885296@qq.com

水泥的水化反应过程是水泥发挥其各项效能的基础,正确地认知水泥的水化反应对充分发挥水泥效能,选择合适的水泥使用条件,解决现代混凝土在生产运营中各种问题具有十分重要的意义。

混凝土质量随着水泥生产技术的进步而提升,其28天强度大有改观,能满足水泥标准的相关评定标准,但28天后强度如何发展,并未给予相应规定<sup>[6]</sup>。

现有大量检测结果表明<sup>[7]</sup>,随着时间的增长,传统水泥的水化作用程度也有一定的增加。如:1995年利用已经经过抗压试验的试块修筑小路,并在其上用5 cm的水泥砂浆压光抹平。10年后,将试块取出,并结合10年前的原始记录,对试块进行测试,发现较完整的试块,强度增大幅度很大。部分完整试块数据见表1。

表1 混凝土试压强度比较

序号	成型日期	强度等级	R28 /MPa	10年后压 /MPa	增长率 /%
1	1994.09.26	C30	30.1(R9)	70.7	135.0
2	1994.11.25	C30	35.6	54.2	52.2
3	1994.09.04	C20	12.4	26.9	116.9
4	1994.11.09	C20	20.0	38.4	92.0
5	1995.04.23	C20	22.2	42.7	92.3
6	1995.05.02	C15	19.6	34.7	77.0
7	1995.04.20	C20	19.6	34.7	77.0

表1数据表明,随着时间的继续增长,同一试块在水化作用的继续反应下,其试块抗压强度增长明显,增长率甚至可达100%及以上。抗压强度的增加,表征一定程度上水泥混凝土的水化程度增加。

近年来,国内外已有大量学者对纯水泥体系中的水泥水化程度做了相应研究,并形成一些比较成熟的理论和相对可行方法,如:水化热法、化学结合水法等<sup>[8]</sup>。但这些测试表征方法,均存在一些局限性:

(1)水化热法虽对纯水泥体系的早期水化程度有很好的表征效果,但该方法不适于长龄期水泥水化程度的测试。

(2)化学结合水法也仅适合于纯水泥体系中水化程度的研究。

对于水泥基复合型体系的长龄期水化程度研究<sup>[9]</sup>,由于传统研究分析方法自身不足,且冲击弹性波检测技术在混凝土无损检测中扮演着重要的角色,冲击弹性波波速被广泛用于评定混凝土的质量,强度和内部缺陷等,为此,可根据弹性波波速对水泥水化程度进行一定表征。

## 2 冲击弹性波检测技术

吴佳晔<sup>[10]</sup>等根据检测所用的信号媒质不同,将混凝土无损检测技术分为冲击弹性波(包括冲击、弹性波、超声波、AE)/诱导振动、电磁波/电磁诱导、红外线谱、放射线等方法。其中冲击弹性波/诱导振动、电磁波/电磁诱导在工程现场无损检测中应用最广泛。

冲击弹性波能够直接反映材料的力学特性,是工程检测中最常用的媒介之一,冲击弹性波通过冲击锤或电磁击振装置冲击产生,具有击振能量大、操作简单、便于频谱分析等特点,是一种非常适合工程无损检测的媒介。

冲击弹性波已广泛应用于混凝土无损检测中,如基础工程中常用的低应变法测桩长,LU X B<sup>[11]</sup>提出的冲击回波法测试混凝土动弹性模量。弹性波有易于产生,且击振能量大、操作简单、便于频谱分析等特点,也很适合应用于混凝土强度分析。

评价混凝土质量的指标有很多,但最重要的指标是其轴心抗压强度 $S_c$ 和弹性模量 $E_c$ 。其中,轴心抗压强度 $S_c$ 一般采用立方体标准试件测得,概念明确,试件的测试方法较为简单,应用最为广泛。但对于实体结构,难以直接测试其强度。混凝土的弹性模量决定了结构的变形特性,而且与强度、耐久性均有非常密切的关系。

采用冲击弹性波作为测试媒介,通过测试弹性波的波速,据此计算材料的动切线弹性模量和推算相应的混凝土弹性模量 $E_c$ ,进而根据 $E_c$ 与抗压强度的相关关系推算混凝土的抗压强度。其核心在于精确地测试混凝土材料的弹性模量 $E_c$ 。

重复反射法(冲击回波法,也称IE法):在被测混凝土结构的壁厚已知的前提下,利用弹性波的重复反射,可测出弹性波在被测混凝土试件的传播时间和弹性波波速,从而计算出混凝土的弹性模量,进而能够推算混凝土的强度指标。该方法也称“冲击回波法”,具有测试效率高、测试结果客观性强的特点,因此具有广阔的应用前景。

针对构件(试件)的形状与测试的位置,该方法又可分为纵向测试与横向测试:

(1)纵向测试:测试弹性波的传播/反射方向与结构的长轴平行(如基桩)。

(2) 横向测试: 测试弹性波的传播/反射方向与结构的短轴平行(如楼板)。

波速  $V_{pr}$  可由板厚  $H$  与反射时间  $T_r$  求出:

$$V_{pr} = \frac{2H}{T_r}$$

### 3 弹性波应用

应相关单位邀请委托,对修建于20世纪90年代的四川省某大型水坝进行混凝土取芯及混凝土芯样弹性波波速/部分力学性能测试,据提供资料,该大坝坝体设计强度为C25。

现场测试采用冲击回波法对所取芯样进行波速测试,现场测试如图1所示,测试结果见表2。



图1 现场测试图

表2 芯样弹性波波速/部分力学性能

取芯位置	取芯深度/m	弹性波波速/(km/s)	抗压强度/MPa	增长率
上游干燥区	0.4	3.755	38.2	52.8%
		3.968	/	/
	1.2	4.196	50.7	102.8%
	2.0	3.968	38.4	53.6%
	3.2	3.91	38.2	52.8%
	4.2	3.91	39.4	57.6%
	5.6	3.618	37.4	49.6%
	6.8	3.877	43.2	72.8%
水位变化区		4.06	/	/
	9.3	3.999	47.2	88.8%
		4.159	/	/
	10.0	4.073	46.7	86.8%
		4.12	44.1	76.4%
上游水下区	10.7	4.024	/	/
		3.982	/	/
	11.8	3.982	41.3	65.2%
	12.5	4.119	50.2	100.8%
	14.2	3.872	40.9	63.6%
	14.9	3.803	46.2	84.8%
	3.842	37.5	50.0%	
	3.942	/	/	
备注	因该批混凝土前期资料遗失,因此计算强度变化前按照设计强度25 MPa进行估算。			

根据测试结果表明:

(1) 混凝土经过20年后,混凝土的强度存在不同程度的增长,均大于C25的设计强度,混凝土强度增长均在50%以上。

(2) 根据弹性波波速与混凝土强度关系的试验研究<sup>[12]</sup>,对弹性波波速与强度拟合出相关曲线(图2)。

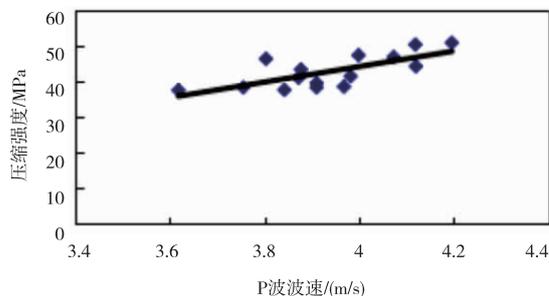


图2 弹性波波速与强度关系图

通过对P波波速的测试,能够准确反应混凝土强度的变化;同时根据相关关系,可推算其他未压载试件的强度均一定程度上大于设计强度。

(3) 波速测试结果分析,经过近30年的时间,混凝土强度(波速)的增长与其所处的环境(上游干燥区、水位变化区、上游水下区)关系不明显。

### 4 原因分析

为了深入分析混凝土的强度变化的原因,业内研究者对不同时期的混凝土试件进行持续一百年的强度测试<sup>[13]</sup>。

始建于1897年的小樽港,在建设初期制作了6万多个试件,放在海水中、大气中、淡水中分别进行长期耐久性试验,试验结果表明,三者的长期强度发展趋势基本一致,其中,试件在自然的大气环境中存放30~40年强度达到最高,大约提高100%,然后逐年下降,存放95年,强度从最高点下降约40%,但仍高于28天强度20%,表明早期混凝土的强度寿命在百年以上,水化反应过程持续周期长,使其混凝土后期强度满足结构长期耐久性的使用。

现代混凝土使用的水泥大部分为“瘦身水泥”,造成混凝土水化过程过早完成。具体特征大致为两个方面:一是水泥颗粒粒径越来越小,比表面积增大<sup>[14]</sup>。二是用矿物掺合料<sup>[15]</sup>替代部分水泥以后,单位体积中的水泥用量越来越少,而矿物掺合料用量越来越多。

据相关研究表明<sup>[16]</sup>,熟料颗粒的水化程度有相应规

律:与组成相同的普通波特兰水泥相比,微细水泥在2 h前的水化活性显著提高,随着水泥颗粒粒径的变化增大,强度达到50%所需的时间相应会增加。造成微细化水泥水化速率提高的原因有<sup>[17]</sup>:

(1)比表面积大幅增加,相应的与水接触的面积增加,矿物质溶解迅速。

(2)微细化过程造成比表面积增加的同时,颗粒表面的组分更利于水化。

(3)在微细化过程中可能发生了选择性粉磨效应,从而造成在微小颗粒中反应活性高的物质含量相对富余。

(4)大量应用矿物掺合料及有机化学外加剂<sup>[18]</sup>等,也是影响水泥水化反应的重要因素。

## 5 结论

(1)水泥水化反应是一个相对持续的过程,在不同的影响环境下,其反应程度随时间的增长不尽相同;冲击弹性波能够高效便捷地对水泥水化作用程度进行检测,并区分不同的水化作用程度。

(2)水泥水化反应过程是相当复杂的过程,很难准确地跟踪反应研究。利用冲击回波法对混凝土波速进行测试,可以大致把握混凝土水化反应进行的程度,判断混凝土结构裂缝的“自愈能力”。根据相关研究,混凝土具有很强的自愈能力,其来源就是混凝土中水泥水化反应的持续能力。

(3)为了使混凝土具有较强的“自愈能力”,明确影响水泥水化反应的因素非常有必要。其中原材料的影响是不可忽略的,原材料本身具有的性质对水化反应的进行具有复杂的影响,需进一步进行机理研究。

(4)冲击弹性波作为无损检测媒介,具有易于产生、能量强、适用范围广等特征,可方便地对混凝土波速进行跟踪测试,对研究混凝土内部水泥的水化反应速度提供了重要手段。

## 参考文献:

[1] 贾海涛,侯帅,张立泉,等.简述水泥的组成、水化反应及化学腐蚀[J].商品混凝土,2015(12):72-74.  
[2] 李林香,谢永江,冯仲伟,等.水泥水化机理及其研究方法[J].混凝土,2011(6):76-80.

[3] 吕小彬,吴佳晔.冲击弹性波理论与应用[M].北京:中国水利水电出版社,2016.  
[4] 吴佳晔.土木工程检测与测试[M].北京:高等教育出版社,2015.  
[5] 李国斌.中空锚杆无损检测方法的研究及应用[J].四川理工学院学报:自然科学版,2016,29(4):55-58.  
[6] 佚名.对现代混凝土质量问题的反思及对策[J].水泥助磨剂与混凝土外加剂,2015(6):24-27.  
[7] 杨文科.现代混凝土科学的问题与研究[M].北京:清华大学出版社,2015.  
[8] 王培铭,丰曙霞,刘贤萍.水泥水化程度研究方法及其进展[J].建筑材料学报,2005,8(6):646-651.  
[9] 陈昕.复合水泥基材料中水泥的水化程度分析[J].建筑与工程,2012(31):405-405.  
[10] 吴佳晔,安雪晖,田北平.混凝土无损检测技术的现状和进展[J].四川理工学院学报:自然科学版,2009,22(8):4-7.  
[11] LU X B.Evaluation of dynamic modulus of elasticity of concrete using impact-echo method[J].Construction and Building Materials,2013(47):231-239.  
[12] 周健,赵飞阳,白彦峰,等.弹性波速与混凝土强度关系的试验研究[J].矿产勘查,2009,12(10):71-73.  
[13] 冯乃谦.在港湾、海洋结构中水泥混凝土的长期性能[J].混凝土与水泥制品,2002(6):11-16.  
[14] 史艳忠.由水泥颗粒比表面积引发的思考[J].山西建筑,2010(36):151-152.  
[15] 辛苗.外加剂和掺合料对混凝土强度和耐久性的影响[J].工程技术,2016(4):16.  
[16] 马振珠,岳汉威,宋晓岚.水泥水化过程的机理、测试及影响因素[J].长沙大学学报,2009(2):43-46.  
[17] 朱明,胡曙光,丁庆军.水泥基材料的微细化及其对水泥水化性能的影响[J].建筑发展导向,2003(4):26-30.  
[18] 孔祥明,卢子臣,张朝阳.水泥水化机理及聚合物外加剂对水泥水化影响的研究进展[J].硅酸盐学报,2017,45(2):274-281.