

# 混凝土电阻率测量方法与应用

钱觉时<sup>1</sup>, 徐姗姗<sup>1</sup>, 李美利<sup>1,2</sup>, 王立霞<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400045; 2. 河南省建筑科学研究院有限公司, 河南 郑州 450053)

**摘要:** 电阻率测量方法可以作为混凝土的一种无损检测技术。通过研究混凝土电阻率测量的常用方法和分析存在的问题, 认为现有方法测量的电阻率用于混凝土性能表征还有很多问题有待解决。讨论了混凝土电阻率的测量方法与应用研究的重点方向, 指出应关注混凝土电阻率用于混凝土性能表征的方法研究。

**关键词:** 混凝土; 电阻率; 测量方法; 表征

中图分类号: TU528.01 文献标志码: A 文章编号: 1672-3767(2010)01-0037-06

## The Measurement and Application of Resistivity for Concrete

QIAN Jue-shi<sup>1</sup>, XU Shan-shan<sup>1</sup>, LI Mei-li<sup>1,2</sup>, WANG Li-xia<sup>1</sup>

(1. College of Material Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. Henan Architectural Research Institute Co. Ltd., Zhengzhou, Henan 450053, China)

**Abstract:** The measurement of resistivity can be used as a nondestructive test technique for concrete. We believe that there exist many problems to be solved for the existing method measuring the resistivity used in expressing the performance characterization by introducing the problems existed in the common method and analysis of resistivity measurement for concrete. The measurement of resistivity for concrete and the main direction of application study are discussed and, further pointing out that people should pay much attention to study of the method that the concrete resistivity is used in performance characterization of concrete.

**Key words:** concrete; resistivity; measurement; characterization

近年来,随着混凝土应用技术的不断发展,有关混凝土检测技术的研究也在不断深入。传统的检测手段不仅要受到检测环境、检测条件的影响,而且只是随机取样,不能全面、准确反映混凝土的实际情况,现场检测还可能对混凝土结构有一定损伤。显然,无损检测是获得真实混凝土质量的较为有效的方法。无损检测技术主要有超声法、雷达法、红外成像法、声发射法以及冲击回波法等<sup>[1]</sup>。

一般认为混凝土是电的不良导体,使得混凝土电阻性能的研究十分有限。近年来,随着导电混凝土研究的深入,电阻率的测量方法也逐渐受到人们的关注。电阻率是容易通过简单的试验手段而得到的参数,通过测量电阻率,不仅可以用来评估钢筋的锈蚀情况,而且可以很好地与混凝土其他性能建立联系,进而反映混凝土的质量状况。混凝土电阻测量简单、快速、易于操作,有望成为一种新的混凝土无损检测技术而应用于混凝土工程中。

本文通过对常用的混凝土电阻率测量方法进行比较,分析现有混凝土电阻率测量方法存在的问题,讨论混凝土电阻率用于表征混凝土性能的前景与值得深入研究的问题。

## 1 混凝土电阻率的测量方法

混凝土电阻率测量方法已有多种,一般按测量方式可分为接触式和非接触式<sup>[2]</sup>两类。接触式可以分为

收稿日期: 2009-04-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(50404005)

作者简介: 钱觉时(1962—),男,安徽桐城人,教授,主要从事水泥混凝土及固体废弃物资源化利用等方面的研究。

二电极法和四电极法<sup>[3-4]</sup>,是目前使用比较多的混凝土电阻测量方法之一;非接触式是近几年新兴的一种测量方法,已有比较多的研究者开始采用。此外,交流阻抗谱法<sup>[5]</sup>也逐渐应用于水泥基材料有关电阻性能的研究。

### 1) 二电极法

二电极法包括外贴式<sup>[6]</sup>和埋入式两种<sup>[7]</sup>。该方法是在试块两端外贴或是在试块内部预埋两平行电极,通过测量电压和电流值,根据欧姆定律计算试块的电阻值。

### 2) 四电极法

图 1 为四电极法测量混凝土电阻率示意图。该方法是在试块内部预埋四块等间距的平行电极,内侧 BC 两电极间连接测电压  $V$ ,外侧 AD 两电极间连接测电流  $I$ ,由欧姆定律,BC 段电阻值为

$$R = \frac{V}{I} \quad (1)$$

由 BC 段距离  $L$  和极板与试块接触面积  $A$ ,由电阻率计算公式,材料电阻率为

$$\rho = R \frac{A}{L} \quad (2)$$

### 3) 非接触法

非接触式电阻率测量方法是一种比较测量方法,最初主要用于研究水泥凝结时间,装置如图 2 所示<sup>[2]</sup>。1 为双臂型变压器芯;原线圈 2 绕在变压器芯的中间臂 3 的周围;4 为材料样品制成的次级线圈环;线圈 5 用于测量圆环面的电压;6 为在样品截面周围设置的一个 Rogowski 线圈或泄漏电流测量仪,用于测量样品中的电流。材料样品的电阻率为

$$\rho = Rh \cdot \ln(r_{ex}/r_{in}) / 2\pi \quad (3)$$

其中,  $R = V_{p-p} / (I_{p-p} \cos \phi)$  (4)  
式(3)和式(4)中,  $V_{p-p}$  为圆环面电压(峰-峰值);  $I_{p-p}$  为样品中流动的电流(峰-峰值);  $\phi$  为圆环面电压和电流之间的相位差;  $h$  为圆环样品的高度;  $r_{ex}$  为外半径;  $r_{in}$  为内半径。

### 4) 交流阻抗谱法

交流阻抗谱法是通过变化交流电频率,测量复阻抗,得到阻抗谱曲线,进而反映了水泥基材料水化过程的特性。其方法原理是:根据水泥基材料水化过程的特点,设计一个由电阻电容串联和并联组成的等效电路。其中各串、并联组件反映水泥基材料水化过程的特性。在测量时,在试块两相对端面上各紧固一不锈钢电极,其中一端连接恒电位仪的工作电极,另一端与仪器对电极和参比电极相连<sup>[5,8-9]</sup>。

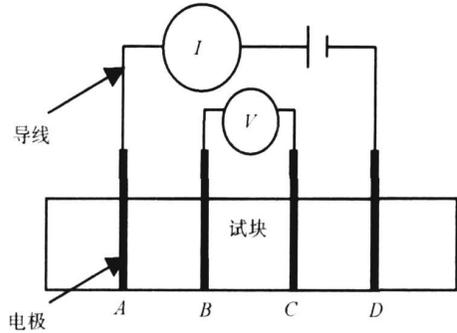


图 1 四电极法用于混凝土电阻率测量图  
Fig. 1 The four embedded electrodes used in measurement of resistivity for concrete

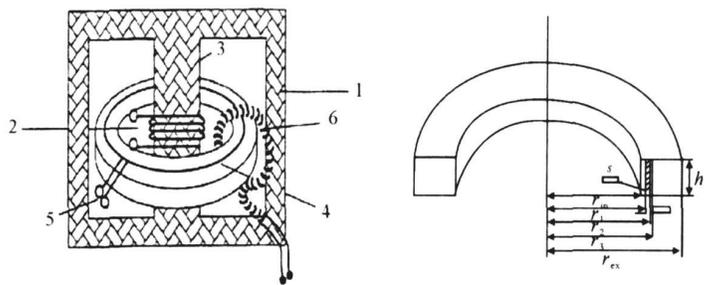


图 2 非接触式电阻率试验图  
Fig. 2 The non-contacted resistivity test

## 2 混凝土电阻率测量方法的应用与问题

### 2.1 电阻率用于混凝土性能的表征

混凝土作为结构材料,习惯上被认为是电的不良导体,混凝土电阻率指标通常没有任何的意义,因此人们也不关心混凝土电阻率的高低。但近年来混凝土电阻率已开始受到关注。

#### 1) 电阻率用于混凝土性能表征的优势

①电阻率的测量方法相对比较简单和快速,必要时还可进行长期在线监控,这是因为有关电性质的测量技术比较成熟,甚至可以进行无线远程监测;②测量电阻率不需要对混凝土结构进行破坏,可将电极永久埋入混凝土之中,因此对混凝土无任何损伤,属于无损检测范围;③对于有需要的结构部位,可以进行反复多次的测量,这在一定程度上提高了测量的准确度和有效性,也便于与之前的结果进行对比,判断突发状况的发生;④与其他常用的无损检测方法相比,测量电阻率不需要借助大型仪器,测量成本比较低。

2) 高性能混凝土的电阻率要求

近年来随着高性能混凝土的研究与应用,人们开始关心高性能混凝土的电阻率。高性能混凝土应该具有高的电阻率,因为混凝土电阻率太低可能影响钢筋保护效果。对于成熟期为6个月的高性能混凝土湿试件,电阻率在470~530 Ω·m 范围之内,比普通混凝土高10倍。当电阻率>500 Ω·m 时,可大大抑制钢筋锈蚀。

3) 电阻率用于表征混凝土渗透性能

赵铁军<sup>[10]</sup>利用高频低压交流电,通过测量电阻率来反映混凝土的渗透性,克服了直流电量的极化反应和溶液温度升高的缺点,缩短了试验时间。具体评定标准见表1。

表1 混凝土渗透性与电阻关系表

Tab. 1 The relationship between the permeability and resistivity of concrete

电阻/Ω	< 350	650~ 350	1 150~ 650	3 700~ 1 150	> 3 700
渗透性	高	中等	低	很低	可忽略

4) 电阻率用于混凝土凝结和硬化表征

水泥混凝土随水化过程进行,由于水分的消耗,电阻率也发生比较大的变化,因此可以通过测量混凝土电阻率的发展变化,从而间接反映水泥混凝土凝结硬化情况<sup>[11]</sup>。有很多研究者采用非接触电阻率测量方法来表征水泥早期的水化行为、混凝土早期力学性能和内部微结构变化。隋同波等<sup>[12]</sup>研究认为,电阻率可以反映水化进程,电阻率的变化可以反映水化程度的变化。张丽君等<sup>[13]</sup>研究认为,电阻率曲线不仅可以表现掺矿物掺合料的浆体的水化过程,也可以表现掺合料的活性大小。

5) 电阻率用于混凝土裂缝的表征

混凝土的结构裂缝不仅会降低抗渗性能,而且会引起钢筋锈蚀,加速混凝土的碳化,是影响结构耐久性的一个很重要的因素。混凝土发生开裂和因开裂湿度下降,都会使得电阻率显著增大。艾亿谋等<sup>[14]</sup>研究结果证实通过电阻率测量不仅可以准确找出裂缝的位置,而且可以确定的裂缝深度和裂缝密度。

2.2 现有电阻率测量方法用于混凝土性能表征存在的问题

1) 测量方法存在的问题

目前普遍认为二电极与四电极测量方法相比较为简单。但唐祖全等<sup>[6]</sup>在研究导电混凝土电热特性中发现,无论是用伏安法还是数字万用表进行测量,二电极法都无法消除接触电阻对测量结果的影响,测得的电阻值不仅包括混凝土材料本身的电阻值,还包括导线与测量仪器、导线与电极、电极与混凝土的接触电阻。接触电阻与电极的材料、尺寸有关,接触电阻对测量值影响较大,因而不能较为真实地反映混凝土材料本身的电阻情况。韩宝国等<sup>[15]</sup>研究认为,碳纤维水泥石电阻率测量方法宜采用插入式四电极法,二电极法与四电极法测得的电阻值相差很大,四电极法测得的电阻值符合叠加原理,而二电极法的电阻值几乎没有规律,如表2所示。

表2 二电极法与四电极法电阻测量结果表

Tab. 2 The testing results of resistivity with two methods

测量方法	电阻值/Ω		
	$R_{AB}$	$R_{BC}$	$R_{AC}$
四电极法	0.86	0.84	1.71
二电极法	2.36	2.42	2.94

注:  $R_{AB}$ 、 $R_{BC}$ 、 $R_{AC}$  参见图1。

相比之下,非接触法能较好地消除电极的极化和电容效应,测量误差可控制在0.5%以内,且重复性好<sup>[16]</sup>。LAKSHMINARAYANAN<sup>[17]</sup>研究认为,用直流电测量电阻时,会产生电容效应和极化效应,使测量值与实际值误差很大。HANSSON<sup>[18]</sup>分析了直流电和交流电以及电极所带来的电容效应和极化效应。HUGHES<sup>[19]</sup>证实使用交流电可以消除电容效应和极化效应所引起的误差。

虽然已有很多研究者对混凝土电阻率测量方法进行了研究,也提出了比较多的改进措施,但现有混凝土

电阻率测量方法还存在问题: 二电极法不能消除接触电阻的影响; 四电极法可以较好地降低接触电阻的影响, 但电极制作非常麻烦; 使用直流电测量得到的电阻率数据稳定性不好, 重复性差, 得出的结论往往难以让人信服; 交流电测量较复杂, 且频率的选择对电阻率有一定影响; 非接触法目前还仅适用于实验室内对早期小体积的水泥基材料样本的研究, 不适合用在实际工程的在线分析, 且需要较为精密的测量仪器; 使用交流阻抗谱法得出的等效电路的参数比较复杂, 需要借助数学分析手段对电阻率数据进行分析。

## 2) 表征的有效性

作为定性反映混凝土的电阻率高低, 如, 作为钢筋保护和导电混凝土研究的需要, 现有电阻率测量方法虽然有差异, 但给出的测量结果是有参考价值的, 特别是所给出的为对比试验结果的情况更是如此。但如果将电阻率参数用于混凝土其他性能表征, 则测量方法的有效性是非常重要的。

虽然已有比较多的研究结果显示, 混凝土电阻率参数可以较好地表征其他性能变化规律, 但这些研究结果都不能回避这样一个共同问题: 在研究时混凝土其他性能参数保持不变, 研究某一或某几个性能变化时电阻率的变化规律, 然后通过建立的电阻率与其他性能之间的关系, 再以电阻率来推定混凝土其他性能; 但电阻率参数表征的前提是这种关系在任何条件下都是基本成立的。

当然, 将电阻率参数用于表征混凝土其他性能时, 可以建立类似标准曲线的基本数据库, 然而影响电阻率变化的因素太多, 无论是材料的组成、用量等内在因素还是环境温度、湿度等外在因素, 都会对电阻率产生比较大的影响, 有些因素的影响甚至使得电阻率数据发生数量级的变化。对于组成材料一定的大型工程, 建立相应的标准曲线是有意义的, 但是对于需要经常变化原材料的工程, 建立这样的标准曲线会非常费时, 甚至是不可能的。

另一方面, 混凝土电阻率受含水率和导电组分的影响很大, 与水化龄期也有很大关系<sup>[20]</sup>。通常认为, 混凝土电阻率越高, 混凝土强度也越高, 结构也越密实。然而, 对于低强混凝土来说, 如果其含水率很低, 电阻率也可能很高, 而高强混凝土某些导电组分较多时, 电阻率也可能比较低, 这也就是说, 不能通过电阻率值的高低来简单判断混凝土的性能状况。在没有参照对比的情况下, 单纯讨论电阻率高低可能意义不大, 甚至可能会出现相反的结果。

# 3 混凝土电阻率的测量方法与应用研究的趋势

## 3.1 电阻率用于表征混凝土性能的重点

根据电阻率本身的特点, 混凝土电阻率参数可以考虑重点用于混凝土以下性能表征。

1) 在线分析和实时监测混凝土发展进程。通过直观、连续的电阻率参数变化可以及时、准确、动态地反映混凝土性能的变化, 进而监控混凝土的整个发展进程。

2) 判断混凝土局部的性能突变。通过同一混凝土结构内部不同位置的电阻率之间的对比, 可以反映电阻率随时间或环境的变化时发生的性能突变。例如, 如果某一位置处电阻率突然增大, 就有可能出现了局部开裂的情况; 而电阻率急剧减小, 则可能是该位置附近出现渗透的情况。

3) 判断混凝土养护程度。由于电阻率对湿度变化十分敏感, 可以通过比较混凝土结构不同部位的电阻率差异情况, 如表层和内部, 进而反映养护状况, 判断养护是否及时、到位, 甚至可以通过实时监控, 反映整个养护历史。

## 3.2 电阻率测量方法的改进

电阻率测量相对比较简单, 电阻率测量过程也不会对测量对象产生破坏。但由于混凝土材料的特点, 电阻率测量方法对混凝土电阻率研究与应用是非常关键的, 因此有关混凝土电阻率测量方法的研究都是非常有价值的。

电阻率测量方法的发展应考虑到两个不同的应用方向: 一是针对混凝土一些难以测量的性能或需要快速测量的性能表征, 另一是实际工程中混凝土性能的在线表征。这两种应用方向对电阻率测量方法的要求可能不完全相同, 如对于实际工程的混凝土性能表征, 测量方法要针对实际工程特点, 测量方法要尽可能简单, 能为施工单位一般技术人员所接受, 同时能同时进行多点的电阻率测量, 且每个测量点的仪器和装置等成本不能太高。

### 3.3 电阻率用于混凝土性能表征方法研究

除针对高性能混凝土对电阻率的要求,混凝土电阻率的测量结果可以作为混凝土一项指标直接采用外,其他情况下混凝土电阻率的测量结果并不能直接用于表征混凝土其他性能,而是需要建立类似标准曲线的数据库。当然要针对配合比或原材料不同的混凝土性能建立这样的标准数据库是比较艰巨的工作,甚至是无法完成的工作。

实际上,电阻率用于混凝土其他性能表征,可以不一定局限于电阻率绝对值的简单比较,可以从以下3个方面进行研究。

1) 利用混凝土电阻率随时间突变的特点。如有些情况下电阻率甚至可以发生数量级的变化,此时就对应着混凝土性能的突变,这种变化规律对不同配合比或不同原材料的混凝土都是相近的,因此可以利用混凝土电阻率的变化来反映混凝土该性能的变化,这时就无需建立类似的标准曲线。

2) 利用混凝土电阻率随位置突变的特点。如发生局部开裂、渗透、碳化、养护不良等情况,该位置处电阻率会发生明显的突变,这样就可以通过不同位置混凝土电阻率的变化判断突变位置。这种情况下可以基本不受混凝土配合比、原材料变化的影响。

3) 利用混凝土电阻率随时间、位置的变化特点。如吸水后的混凝土的电阻率会显著减小,可以通过不同位置电阻率随时间的变化关系,判断混凝土的养护历史。这种情况下也是可以基本不受混凝土配合比、原材料变化的影响。

## 4 结语

电阻率测量方法是一种非常有前途的混凝土无损检测技术,特别在混凝土结构性能监测中有非常广阔的应用前景。虽然针对混凝土电阻率的测量方法比较多,但每种方法都有其局限性,要使得混凝土电阻率作为混凝土性能一种比较有效的表征手段,对测量方法的研究非常必要。

除高性能混凝土外,混凝土电阻率不能直接用于混凝土性能的表征,因此需要研究混凝土其他性能的电阻率表征方法。可以利用混凝土电阻率随时间、位置突变的特点,来快速有效反映混凝土一些性能变化,且可以基本不受混凝土配合比、原材料变化等因素的影响。

### 参考文献:

- [1] 张科强, 杨波. 混凝土的无损检测方法及其新发展[J]. 混凝土, 2007, 22(5): 99-101.  
ZHANG Ke-qiang, YANG Bo. Methods of nondestructive measuring for concrete and its new development[J]. Concrete, 2007, 22(5): 99-101.
- [2] LI Z J, LI W L. Contactless transformer based measurement of the resistivity of materials: U. S. , 6639401[P]. 2003-10-28.
- [3] REZA F, BATSON G B, YAMAMURO J A, et al. Volume electrical resistivity of carbon fiber cement composites[J]. ACI Materials Journal, 2001, 98(1): 25-35.
- [4] WEN S H, CHUNG D D L. Seebeck effect in carbon fiber reinforced cement[J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29: 1989-1993.
- [5] 史美伦. 交流阻抗谱原理及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- [6] 唐祖全, 钱觉时, 李卓球. 接触电阻对导电混凝土电热特性的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2003(4): 10-13.  
TANG Zu-quan, QIAN Jue-shi, LI Zhuo-qiu. Influences of contact resistance on the electro-thermal characteristics of electrically conductive concrete[J]. China Concrete and Cement Products, 2003(4): 10-13.
- [7] 侯作富, 李卓球, 唐祖全. 融雪化冰用碳纤维混凝土的导电性能研究[J]. 武汉理工大学学报, 2002, 24(8): 32-34.  
HOU Zu-fu, LI Zhuo-qiu, TANG Zu-quan. Study on electrical properties of carbon fiber electrically conductive concrete for deicing or snow-melting[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2002, 24(8): 32-34.
- [8] 宋文娟, 杨正宏, 史美伦. 研究水泥基材料性质的时间电流法[J]. 建筑材料学报, 2008, 11(1): 76-79.  
SONG Wen-juan, YANG Zheng-hong, SHI Mei-lun. Chronoamperometry as technique for investigation of cement-based material[J]. Journal of Building Materials, 2008, 11(1): 76-79.
- [9] 张莹, 史美伦. 水泥基材料水化过程的交流阻抗研究[J]. 建筑材料学报, 2000, 3(2): 109-112.  
ZHANG Ying, SHI Mei-lun. Study of the hydration process of cement-based materials by AC impedance technique[J]. Journal of Building Materials, 2000, 3(2): 109-112.

- [10] 赵铁军. 高性能混凝土的渗透性研究[D]. 北京: 清华大学, 1997: 47-50.
- [11] 麻秀星, 钱觉时, 何更新, 等. 混凝土导电性能及其应用[J]. 材料导报, 2008, 22(4): 41-44.  
MA Xi-xing, QIAN Jue-shi, HE Geng-xin, et al. Development and application of concrete electrical conductivity[J]. Materials Review, 2008, 22(4): 41-44.
- [12] 隋同波, 曾晓辉, 谢友均, 等. 电阻率法研究水泥早期行为[J]. 硅酸盐学报, 2008, 36(4): 431-435.  
SUI Tong-bo, ZENG Xiao-hui, XIE You-jun, et al. Early age cement hydration behavior by resistivity method[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2008, 36(4): 431-435.
- [13] 张丽君, 何真, 梁文泉. 电阻率法研究矿物掺合料对水泥早期水化的影响[J]. 混凝土, 2004, 173(3): 32-35.  
ZHANG Li-jun, HE Zhen, LIANG Wen-quan. Resistivity study on early hydration of mineral admixture[J]. Concrete, 2004, 173(3): 32-35.
- [14] 艾亿谋, 杜成斌, 居发亮. 基于电阻率的混凝土裂缝测量方法[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2008, 38(2): 289-292.  
AI Yi-mou, DU Cheng-bin, JU Fa-liang. Concrete crack measurement by electrical resistivity[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2008, 38(2): 289-292.
- [15] 韩宝国, 关新春, 欧进萍. 碳纤维水泥石电阻测试方法研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2003(6): 6-8.  
HAN Bao-guo, GUAN Xin-chun, OU Jin-ping. Study of test method for resistance of carbon fiber reinforced cement[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2003(6): 6-8.
- [16] 何真, 王信刚, 梁文泉, 等. 水泥基材料电性能的研究进展[J]. 建筑材料学报, 2004(1): 46-51.  
HE Zhen, WANG Xin-gang, LIANG Wen-quan, et al. Review of study on electrical property of cement-based materials[J]. Journal of Building Materials, 2004(1): 46-51.
- [17] LAKSHMINARAYANAN V, RAMESH P S, RAJAGOPALAN S R. A new technique for the measurement of the electrical resistivity of concrete[J]. Magazine of Concrete Research, 1992, 44: 47-52.
- [18] HANSSON I L H, HANSSON C M. Electrical resistivity measurements of Portland cement based materials[J]. Cement and Concrete Research, 1983, 13(5): 675-683.
- [19] HUGHS B P, SOLEIT A K O, BRIERLEY R W. New technique for determining the electrical resistivity of concrete[J]. Magazine of Concrete Research, 1985, 37(12): 243.
- [20] 钱觉时, 李长太, 唐祖全. 掺合料对钢渣混凝土电阻率的作用[J]. 粉煤灰综合利用, 2004(4): 7-9.  
QIAN Jue-shi, LI Chang-tai, TANG Zu-quan. The effect of mineral blenders on the electrical bulk resistivity of steel-slag concrete[J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2004(4): 7-9.