

文章编号:1671-6833(2009)01-0106-05

电阻率法用于高性能混凝土养护程度的评价

李美利, 徐姗姗, 钱觉时, 王立霞

(重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400045)

摘 要: 提出了一种新的用于判断混凝土养护程度的电阻率法: 采用内置铜电极和改进电阻率测量方法, 选取自然养护、标准养护、水中养护3种典型的养护制度, 通过不同深度的电阻率变化来反应混凝土内部的湿度梯度变化, 进而反映混凝土养护状况。试验结果表明: 混凝土的电阻率受养护条件的影响十分显著, 通过距离表面不同深度处的电阻率差异能够很好反映混凝土的养护程度, 不同养护制度主要影响距离表面1~3 cm处混凝土的电阻率。基于混凝土的电阻率, 可以将养护质量划分为三个等级, 即养护充分、养护一般和养护不良。对于粉煤灰高性能混凝土来说, 28 d距离混凝土的表面2 cm处电阻率 $< 15 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ 为养护充分, $15 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm} \sim 100 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ 为养护一般, 而 $> 100 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ 则养护不良。电阻率法可以有效应用于现场混凝土工程检测。

关键词: 电阻率; 评价; 养护; 高性能混凝土

中图分类号: TU 528.01

文献标识码: A

0 引言

对现场混凝土养护效果的快速评价一直是制约现场检测的难题, 使得目前现场混凝土的养护一直被忽视, 进而直接影响到获得理想质量的混凝土, 而对于高性能混凝土(HPC)来说, 由于其自身的特点^[1], 充分的养护更是尤为重要。因此建立一个简单、快速的现场养护评价手段就显得尤为重要。

混凝土养护评价的研究最早是由 Ephraim Senbetta 用吸水率的指标提出^[2], ASTM C1511 认为普通混凝土的表面吸水率 $K_a \leq 3.7 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ 则养护良好, 但此方法仅适用于对早期普通混凝土的评价, 而 28 d 后各养护制度的表面吸水率差异并不明显。詹炳根等在改进吸水率试验方法后, 通过经时吸水率指标得出混凝土不同深度的微观孔结构参数评价养护充分与否^[3], 但切割试样对混凝土结构造成了一定破坏, 使得试验结果仍与实际情况有一定差距。

混凝土电阻率是对混凝土中含水量变化极为敏感的参数, 如果将其与养护程度建立联系, 则可用于评价混凝土的养护效果。电阻率在早期不仅

能够很好反映混凝土内部湿度梯度变化, 后期也可以反映混凝土渗透性。W. John McCarter 等利用电阻率的方法对表层混凝土的性能进行了研究^[4], 也有用于钢筋混凝土耐久性评价^[5], 国内也有不少研究者开展混凝土的电阻研究^[6-10]。但已有的研究大多是通过电阻变化研究混凝土中胶凝材料和掺合料的水化程度, 将混凝土电阻与养护程度相联系的研究很少报道。作者选择掺加粉煤灰的混凝土, 通过改变混凝土的养护条件, 研究距离表面不同深度处的混凝土电阻率变化, 提出一种可用于评价混凝土养护程度的电阻率法。

1 试验材料与方法

1.1 试验原材料

水泥为河南天瑞水泥厂 P. O. 42.5 水泥, 化学组成及物理性能见表 1。粉煤灰为焦作神发粉煤灰选粉厂 I 级灰, 需水量比 93%; 鲁山河砂, 细度模数 2.7.5~20 mm 贾峪碎石; 减水剂为河南银洲新型建材有限公司 SAF 高效减水剂; 铜片电极均为 10 mm×10 mm 紫铜。

1.2 试验方法

混凝土电阻测试方法可以分为接触式与非接

收稿日期: 2008-09-15; 修订日期: 2008-10-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50404005)

作者简介: 李美利(1964-), 男, 河南辉县人, 教授级高级工程师, 博士研究生, 主要从事高性能混凝土方面的研究。

表 1 水泥化学组成及物理性能

Tab.1 The physical properties and the composition of cement

细度/%	化学成分/%		烧失量/%	凝结时间/(h:min)		3 d 强度/MPa		28 d 强度/MPa	
	MgO	SO ₃		初凝时间	终凝时间	抗折	抗压	抗折	抗压
1.3	3.06	2.26	1.23	3:00	4:00	5.6	25.0	8.9	49.6

触式两类,接触式较为常见,非接触式是近几年新兴的测试方法^[11]。接触式可以分为二电极法、四电极法和单电极 3 种。本研究采用接触式二极法,并用交流电代替了直流电流法,可消除直流电极化作用对测量结果的影响。

电极埋入混凝土前预先将铜片电极表面打磨抛光,先后用无水乙醇、丙酮擦净表面油污。将原材料干拌 1 min,减水剂与水混合后加入并拌合均匀,在 100 mm×100 mm×400 mm 试模中成型后,平行埋入铜片电极,两电极间距约为 40 mm,埋入深度为 10~50 mm,之后振动成型,1 d 后脱模,将试样两端用石蜡密封,在 3 种不同养护制度下养护,分别为:a(室外自然养护)、b(水中养护 7 d 后转室外自然养护)、c(标准养护,温度 20±3℃,相对湿度>90%)。实验用仪器为恒电位仪,工作电压:1.9 V。试验数据偏差设定为±25%。试验装置见图 1,试验配合比见表 2,自然条件下的环境温湿度见图 2。

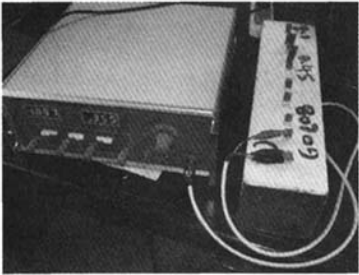


图 1 用于测试电阻率的试验装置
Fig.1 Installation for concrete resistivity test

表 2 试验配合比

	Tab.2 Mixture Proportions						kg/m ³
	水泥	粉煤灰	河砂	碎石	水	水胶比	SAF/%
A0	500	0	640	1 045	175	0.35	2.0
A15	425	75	640	1 045	175	0.35	2.0
A30	350	150	640	1 045	175	0.35	1.8
A50	250	250	640	1 045	175	0.35	1.6
B0	500	0	640	1 045	225	0.45	0.5
B15	425	75	640	1 045	225	0.45	0.4
B30	350	150	640	1 045	225	0.45	0.4
B50	250	250	640	1 045	225	0.45	0.3

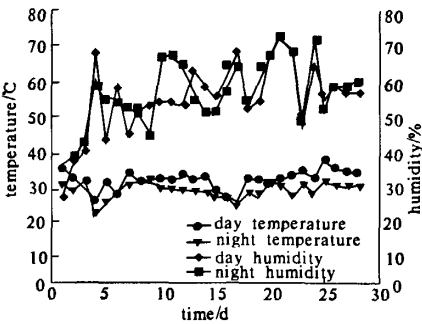
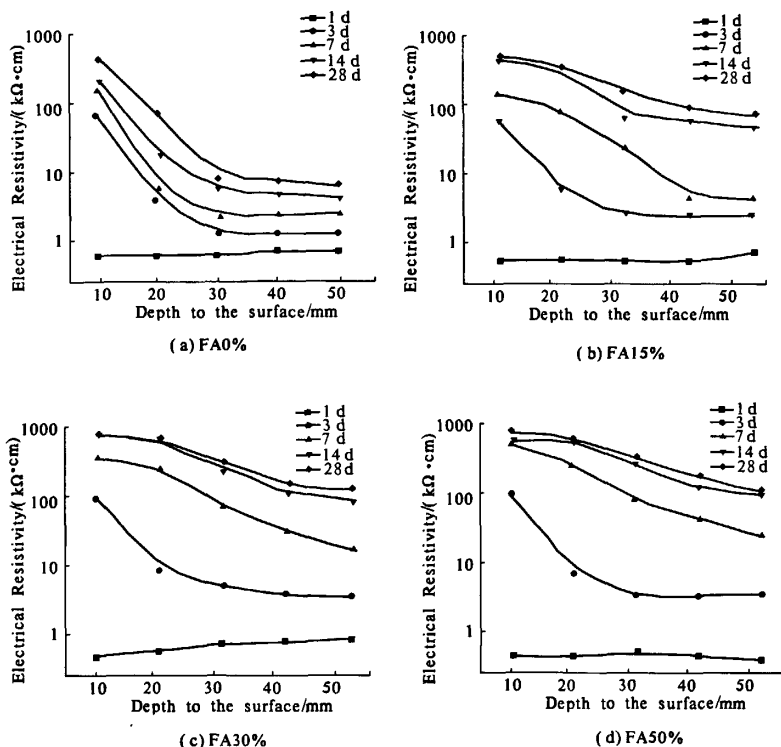
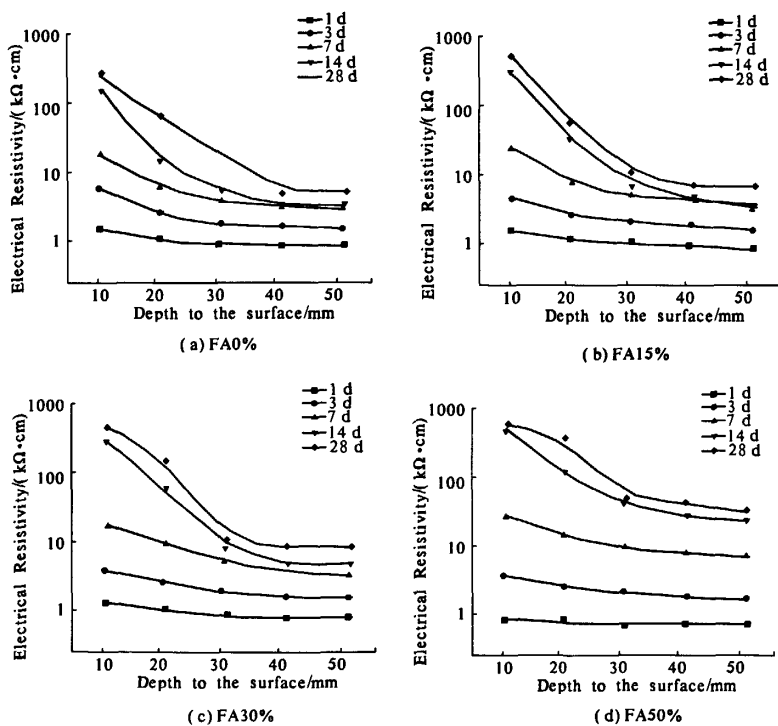


图 2 自然条件温度、湿度
Fig.2 Temperature and humidity in natural curing

2 试验结果及分析

2.1 养护对混凝土的影响深度

图 3 和图 4 分别为室外自然条件下, W/B = 0.35、0.45, 粉煤灰掺量为 0%、15%、30% 和 50% 的电阻率 28 d 内的曲线变化图。从图中可以看出:无论是基准组还是掺粉煤灰组,龄期越长,电阻率越大。1 d 掺粉煤灰 30% 组与基准组电阻率相差不大,之后基准组距离表面 1、2 cm 的电阻率急剧增大,而距离表面 3、4、5 cm 的电阻率变化相对平缓。掺粉煤灰组与基准组相似,也是距离表面 1、2 cm 的电阻率急剧增大,但距离表面 3、4、5 cm 的电阻率也有较大幅度增长。这是由于混凝土体系的导电主要由混凝土内部的液相离子导电和固相电子导电共同作用。电阻率可以分两个阶段反映混凝土的性能。在早期,液相离子导电占主导地位,从混凝土表层到内部存在湿度梯度,电阻率越小,说明混凝土内部湿度越大,这就为水泥水化提供了充足的条件。在后期,随着内部水份逐渐被消耗,液相导电逐渐转化为液相离子导电与固相电子导电共同作用,电阻率逐渐变大,则结构越密实。早期表层混凝土中水分逐渐迁移至表面造成大量散失,水化反应不充分,形成的导电网络少,因而电阻率较内部大。水胶比 0.35 的基准组在 28 d 龄期时距离表面 2、3、4 cm 的电阻率较 1 d 分别增大了 122 倍、13 倍、10 倍,掺粉煤灰 50% 组在 28 d 龄期时距离表面 2、3、4 cm 的电阻率较 1 d 分别增大了 1 077 倍、430 倍、276 倍。水胶比

图3 自然条件下混凝土电阻率($W/B=0.35$)Fig.3 Concrete resistivity in natural curing ($W/B=0.35$)图4 自然条件下混凝土电阻率($W/B=0.45$)Fig.4 Concrete resistivity in natural curing ($W/B=0.45$)

0.45 的基准组在 28 d 龄期时距离表面 2,3,4 cm 的电阻率较 1 d 分别增大了 55 倍、6 倍、5 倍,掺粉煤灰 50% 组在 28 d 龄期时距离表面 2,3,4 cm 的电阻率较 1 d 分别增大了 409 倍、69 倍、53 倍. 这说明了养护制度对混凝土表面 1~3 cm 的距离影响显著. 粉煤灰的二次水化反应以及填充效应,使得结构更为密实,电阻率也较大. 也说明掺粉煤灰混凝土的电阻率比基准组较养护制度更为敏感,水胶比越低,粉煤灰用量越大,越敏感. 可见湿养对粉煤灰混凝土来说,更是尤为重要.

2.2 养护制度对粉煤灰混凝土电阻率的影响

图 5 为距离表面 2 cm 处, a、b、c 3 种养护制度下, $W/B = 0.35$ 、0.45, 粉煤灰掺量为 0%、15%、30%、50% 混凝土 28 d 的电阻率曲线变化图. 从图中可以看出, 水胶比越小, 混凝土的电阻率越大. 标准养护 28 d 试件的电阻率很小, 水中养护 7 d 次之, 而自然养护试样变化最大. 标准养

护条件下, 掺粉煤灰组与基准组相差不大, 电阻率变化范围在 3~6 $k\Omega \cdot cm$ 之间. 水中养护 7 d 电阻率均小于 100 $k\Omega \cdot cm$, 而自然养护条件下, 掺粉煤灰组电阻率明显比基准组大, 并且粉煤灰掺量越大, 电阻率变化越大, 甚至可以达到 500 $k\Omega \cdot cm$ 以上. 混凝土中水分散失可以分为早期的水分蒸发和后期的自干燥, 混凝土在合适的温度、湿度条件下水化物有充分的时间在水泥石中均匀扩散分布, 使混凝土逐渐密实, 水分蒸发量少, 因而电阻率较小. 可见通过电阻率参数可以很敏感的反映混凝土的养护情况, 因此建立一个养护评定标准, 对今后的养护质量的判定提供一定的依据就可能成为现实. 对于粉煤灰混凝土来说, 考虑到电阻率受环境条件变化的敏感性, 可以将划定范围适当放大, 用距离混凝土表面 2 cm 处的 28 d 电阻率将养护质量划分为 3 个等级, 评定标准见表 3.

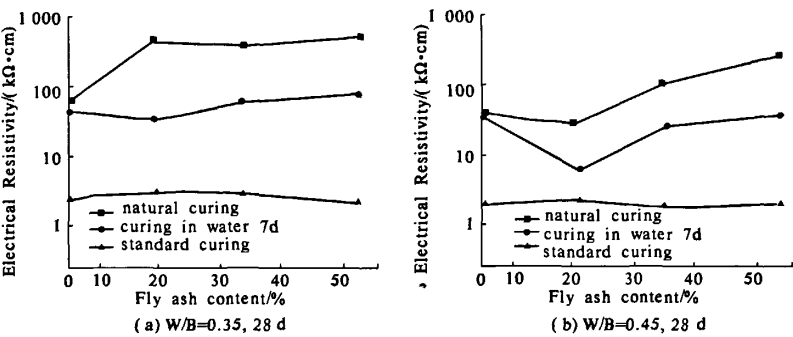


图 5 2 cm处混凝土电阻率
Fig. 5 Concrete resistivity in 2 cm depth

表 3 用电阻率反映混凝土养护质量的评定标准

Tab.3 Resistivity to reflect the quality of concrete curing

电阻率/($k\Omega \cdot cm$)	养护质量
<15	充分
15~100	一般
>100	不良

3 结论

混凝土电阻率对混凝土养护质量的反映十分敏感,可以很好地反映混凝土内部湿度情况及其混凝土密实情况. 用电阻率评价现场混凝土养护效果是有效、可行的. 有理由相信混凝土电阻率将在混凝土无损、快速评价养护效果方面发挥重要作用.

参考文献:

[1] 姚明甫,詹炳根. 高性能混凝土的养护[J]. 工业建筑,2006,36(4),70~72.

[2] EPHRAIM S,CHARLES F S. A new approach for testing concrete curing efficiency [J]. ACI JOURNAL, 1984,(1):82~86.

[3] 詹炳根,丁以兵. 一种评定高性能混凝土养护效果的新方法[J]. 混凝土,2006(2),25~27.

[4] MCCARTER W J, CHRISP M. Monitoring Water and Ionic Penetration into Cover-Zone Concrete [J]. ACI MATERIALS JOURNAL. 2000, 97(6):668~674.

[5] GOWERS K R, MILLAROL S G. Measurent of concrete resistivity for assessment of corrosion severity of steel vsing Wenner Technique [J]. ACT Materials Journal/September~October 1999,96(5),536~541.

[6] 赵铁军. 高性能混凝土的渗透性研究[D]. 北京:

清华大学土木工程系,1997,47-50.

- [7] 路新瀛,张华新,王晓睿. 混凝土渗透性电测方法评述[J]. 混凝土与水泥制品,2003,(4),7-9.
- [8] 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.
- [9] XIAO L Z, LI Z J, WEI X S. Early Setting and hardening process of young concrete using the resistivity measurement[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2005,33(10),1271-1274.
- [10] AI Y M, DU C B, JU F L. Concrete crack measurement by electrical resistivity[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2008,38(2),289-292.
- [11] 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,(3),32-35.

Measurement of Concrete Resistivity for Assessment of the Curing Efficiency of High Performance Concrete

LI Mei-li, XU Shan-shan, QIAN Jue-shi, WANG Li-xia

(College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: In this paper, a new evaluation method was proposed, that is, using electrical resistivity method to assess how well concrete is cured. This assessment was done by subjecting specimens to three different curing conditions such as natural, standard curing and curing in water and measuring the changes in the resistivity at different depths of specimens. The changes reflect the internal humidity gradient of concrete, the curing situation further. According to the changes of the resistivity of concrete, we can make a quantitative estimation of how well concrete is cured. The resistivity measurement was improved, using the embedded copper electrodes. Experimental results show that: the resistivity of concrete is affected by the curing conditions very significantly. It can reflect the quality of concrete sensitively through the differences of the resistance rate of the various depths from the surface. The curing conditions mainly affect the part of the concrete which from the surface of 1-3cm. Based on the resistivity of the concrete at 2cm to the surface, the quality of curing can be divided into three levels, adequately curing, moderately curing, and poorly curing. For the high-performance concrete incorporating fly ash, at 2cm to the surface, the resistivity $< 15 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ can be adequately curing, $15 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm} \sim 100 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ can be seen as moderately curing, and $> 100 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ poorly curing. Resistivity method can be effectively applied for determining how well concrete is cured in-place.

Key words: resistivity; assessment; curing; high performance concrete