

# 电渗滤水混凝土试验研究

迟耀辉<sup>1</sup>, 王立久<sup>2</sup>

(1. 集美大学 工程技术学院, 福建 厦门 361021; 2. 大连理工大学 土木水利学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 实验分析了不同电压、不同水泥品种、缓凝剂对电渗滤水混凝土性能的影响. 表明 ZnO 缓凝剂可以显著提高滤水混凝土的滤水速度, 有力地保障了滤水混凝土的强度和耐久性. 推导了电渗滤水量与滤水时间的关系公式, 给出了可用于实际工程的电渗滤水混凝土配合比设计方法.

**关键词:** 电渗; 滤水; 混凝土

**中图分类号:** TU528 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2008)06-0044-05

## Research on Electroosmosis Filtering Concrete

CHI Yao-hui<sup>1</sup>, WANG Li-jiu<sup>2</sup>

(1. College of Engineering Technology, Jimei University, Xiamen, Fujian 361021, China;

2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

**Abstract:** Main influencing factors of electroosmosis such as voltage, types of cement and retarder are analyzed in this paper. The experimental results indicate that ZnO retarder can increase the filtering velocity markedly, which ensures the strength and durability of filtering concrete effectively. Relationship between filtering capacity and time is then deduced. A design method for mix proportions, which can be used in real engineering, is proposed.

**Key words:** electroosmosis; filtering; concrete

## 0 引言

在新拌混凝土浇注过程中,混凝土拌合物为了获得良好的流动性往往需要加入较多的水,而水泥完全水化所需结合水仅为水泥量的 23%,多余的水在水泥硬化后或残留在水泥石中,或蒸发使混凝土内形成各种不同尺寸的孔隙<sup>[1]</sup>,这些孔隙会大大地减少混凝土抵抗荷载作用的有效断面,特别是在孔隙周围易产生应力集中现象.因此,水灰比愈小水泥石强度及其与集料的粘结强度愈大,混凝土强度愈高.但水灰比过小,混凝土拌合物过于干硬,不易浇筑,不能满足混凝土拌合物的工作性要求,这就造成了混凝土施工的大水灰比要求与为满足混凝土强度要求需要小水灰比凝结之间的矛盾.

为解决这一问题,实现混凝土的优良工作性并保证强度要求,主要有两个途径:传统的方法是添加化学外加剂拌制流态混凝土,但由此产生污染环境、浪费资源、影响混凝土的长期性能以及增加混凝土造价等一系列问题;另一种是改善施工工艺,不添加外加剂仅以大水灰比来实现混凝土的优良工作性.文献[2]提出一种不添加任何化学外加剂并且大量使用工业废弃物粉煤灰作为掺合料的绿色混凝土施工技术——电渗滤水混凝土施工技术,解决混凝土的大水灰比施工与小水灰比凝结之间的矛盾.电渗技术广泛应用于岩土工程软弱地基加固、生物制药和采油工程中,是一种安全环保、简便易行的成熟的施工技术.从 150 多年前俄国学者 Reuss 通过实验发现电渗现象以来,人们对电渗作用的理论和实践进行了一系列的总结和研究.20 世纪中叶,人们开始注意到电渗在岩土工程中的应用问题. L. Casagrande (1994) 首先将电渗用于排水和边坡稳定,后来 (1952) 又将其用于土的加固; Gray 和 Mitchell (1967) 阐述了电渗效率的原理; Esrig (1968) 进一步提出了电渗固结的理论; Veder (1981) 研究了土层中自动电位对边坡稳定性的影响<sup>[3]</sup>. 1997 年, L. Jared West 等用电渗法对含硝酸铅的污染土进行了清洗,同年 J. Q. Shang 和 K. Y. Lo 对含

收稿日期: 2008-07-04. 基金项目: 辽宁省自然科学基金项目 (项目编号: 20062147).

第一作者简介: 迟耀辉 (1970-), 男, 博士, 讲师. 主要研究方向: 建筑材料. E-mail: cyhsqz@jmu.edu.cn

磷肥的粘土进行了成功的电渗净化<sup>[4,5]</sup>. 20世纪50年代末,我国同济大学等单位开始研究电渗用于工程,解决了宝山钢厂铁水包基础开挖、上海真北立交基础施工等难题,完成了海口市龙珠大厦地下室,珠江发电厂泵房的开挖、边坡支护、软基加固施工任务<sup>[6]</sup>. 大连理工大学王立久教授首先将电渗滤水技术与混凝土施工技术相结合,提出了电渗滤水混凝土的专有技术,并获得国家发明专利. 文献[2]通过实验证明电渗技术可以显著提高滤水混凝土的滤水速度,明显提高混凝土的强度,有效地解决混凝土的大水灰比施工、小水灰比固化的矛盾,并有很好的经济性. 文献[2]推导了电渗滤水的一维偏微分方程,并根据边界和初始条件得到电渗滤水的一维偏微分方程的解析解.

本文在以上研究的基础上,实验研究了不同电压、不同水泥品种对电渗滤水混凝土性能的影响. 为保证滤水混凝土的强度和耐久性,确保电渗滤水在水泥初凝前完成,进行了在混凝土拌合物中加入 ZnO 缓凝剂的试验. 在文献[2]推导的电渗滤水一维偏微分方程的基础上,进一步提出电渗滤水混凝土的实用方程,以利于电渗滤水混凝土的配合比设计.

### 1 电渗滤水试验

#### 1.1 试验原材料

本文混凝土试验中试件 1~3 所采用水泥为大连小野田 P. I. 52.5R 硅酸盐水泥,试件 4~6 为大连小野田 P. O. 42.5R 硅酸盐水泥. 细集料采用河砂,表观密度 2 650 kg/m<sup>3</sup>,粗集料采用粒径 ≤ 20 mm 的碎石,表观密度 2 750 kg/m<sup>3</sup>,粉煤灰采用大连北海头热电厂 II 级粉煤灰.

#### 1.2 试验装置

实验中电渗滤水试件为内外双层管网,外层为铁管网,内层为漏孔铝管,试件形状如图 1 所示. 管高  $H = 32$  cm,内管半径  $r_0 = 3$  cm,外管半径  $R = 7.5$  cm.

实验中外层网外加滤布,以防水泥浆渗漏. 实验装置如图 2.

#### 1.3 试验方法

实验配制了 6 种配合比滤水混凝土. 滤水混凝土配合比、塌落度见表 1.

实验中电渗滤水混凝土试件是以外层管网作为阴极排水,漏孔铝管作为阳极. 阴、阳极分别用导线连接成通路,并对阳极施加直流电流,采用 WYJ 直流稳压电源提供直流电压. 应用电压比降使带负电的粒子向阳极移动,

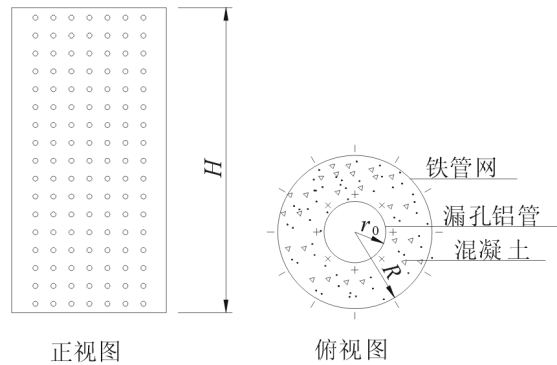


图1 电渗滤水试件示意图

Fig.1 Schematic sketch of specimen

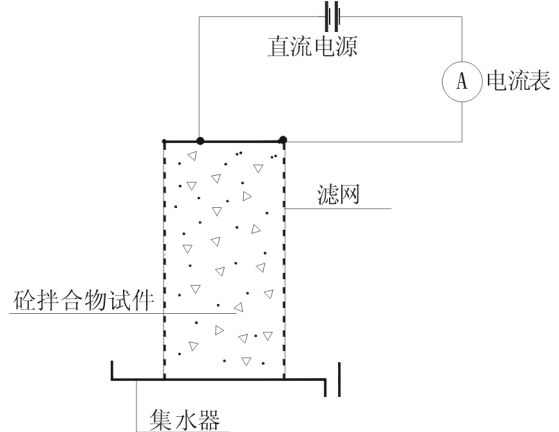


图2 电渗滤水实验装置示意图

Fig.2 Schematic sketch of experimental equipment

表 1 混凝土配合比和实测塌落度

Tab.1 Mix proportions and slump constant of concrete

编号	水灰比	用水量 /kg · m <sup>-3</sup>	水泥 /kg · m <sup>-3</sup>	砂 /kg · m <sup>-3</sup>	石 /kg · m <sup>-3</sup>	粉煤灰 /kg · m <sup>-3</sup>	实测塌落度 /mm
1	0.80	243	304	568	1155	93	180
2	0.75	228	304	560	1155	104	180
3	0.67	204	304	555	1156	104	180
4	0.80	243	304	568	1155	93	220
5	0.55	229	415	559	1117	125	160
6	0.55	229	415	559	1117	125	160

注:试件 5 掺加水泥用量 0.1% 的 ZnO.

带正电荷的孔隙水则向阴极方向集中产生电渗现象。

## 2 实验结果分析

### 2.1 电压分析

从图3可以看出,电势分布大致呈线性.靠近阳极电势下降比较大,其原因是阳极附近的水在电渗的作用下被排出,混凝土拌合物的电阻随之增大.同时,随着时间的增长,这种现象也越明显.

由图4可以看出,随着电压的提高,电渗滤水速度明显加快,滤水量相应提高.电渗流是在电场的驱动下,使带负电的粒子向阳极移动,带正电荷的孔隙水则向阴极方向集中的电致渗流现象,电场增强可以加快滤水速度.电压的提高,相当于提高了滤水水头,因而电渗滤水速度显著提高.电渗时,由于水的流动把气泡带走,可以使混凝土更加密实.

### 2.2 掺 ZnO、未掺 ZnO 电渗滤水混凝土试件的累计滤水量比较

随水化程度增长拌合物的自由水含量降低,贯通的毛细孔减少,滤水途径增长,电渗滤水速度降低.电渗滤水必须在水泥初凝前完成,以免形成渗滤孔道,影响混凝土的强度和耐久性.为延缓水泥水化速度,在混凝土拌合物中加入水泥质量 0.1% 的 ZnO.

由图5可见试件5掺 0.1% ZnO 后,缓凝效果显著.由于 ZnO 的缓凝作用,电渗滤水 20 min 后掺 ZnO 的试件5的滤水速度远远大于未掺 ZnO 的试件6的滤水速度.

水泥的凝结时间与水泥矿物的水化速度、水泥—水胶体体系的凝聚过程、加水量有关.当水泥颗粒水化后,其水化产物大部分在  $10^{-8}\text{m}$  以下,具有胶团结构,双电层和动电电位  $\zeta$ . 在水泥颗粒表面,吸附层中为  $\text{Ca}^{2+}$  离子,在扩散层中主要有  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{H}^+$  等阳离子和一些阴离子.随着扩散层中阳离子浓度不断扩大,双电层压缩、 $\zeta$  电位降低,到  $\zeta$  电位降到一定值 ( $<0.03\text{V}$  时),水泥水化质点开始凝聚,最后逐渐达到终凝状态<sup>[7]</sup>.

ZnO 能够延缓混凝土凝结时间,并对其后期强度无不良影响. ZnO 溶于水中生成离子,被水泥颗粒吸附生成溶解度很小的薄层,使  $\text{C}_3\text{A}$  的水化和钙矾石的形成过程被延缓.

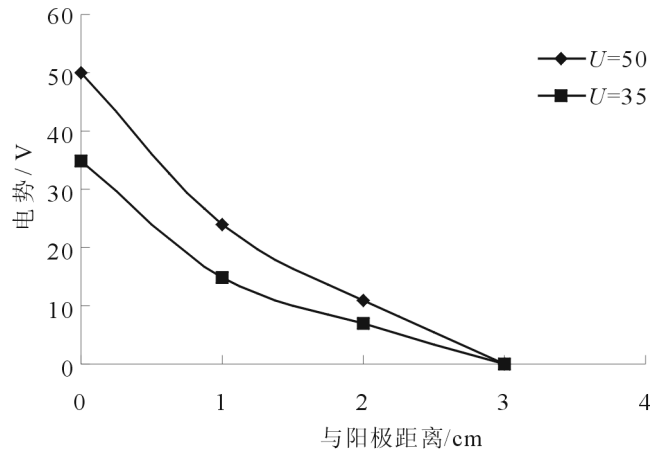


图3 配合比3电势分布图

Fig.3 Variation of voltage gradient of mix proportion 3

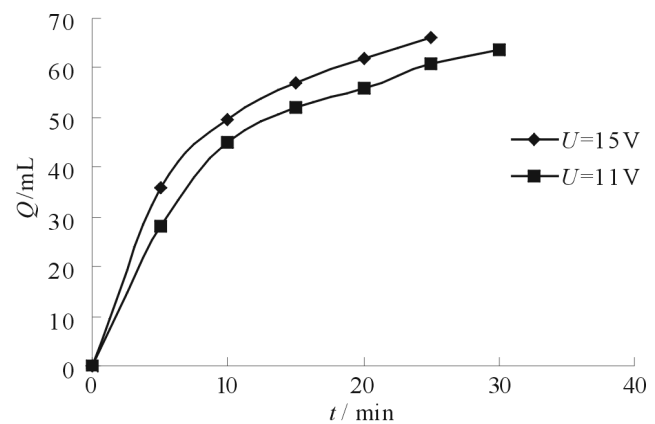


图4 配合比1试件电压对累计滤水量影响图

Fig.4 Cumulative filtering capacity of mix proportion 1 vs voltage

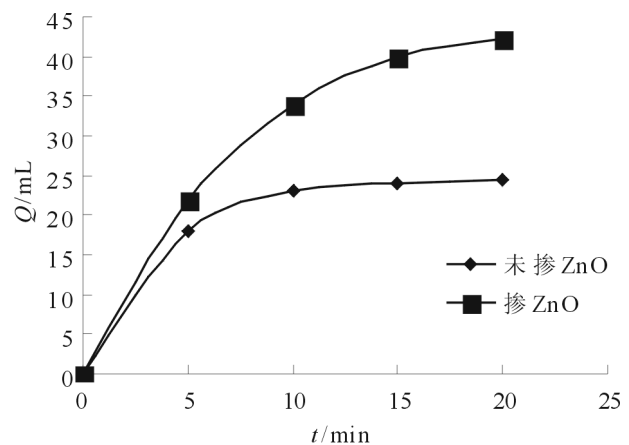


图5 掺ZnO、未掺ZnO试件累计滤水量比较

Fig.5 Comparison of cumulative filtering capacity between using and unusing ZnO specimens

### 2.3 水泥品种影响分析

水泥品种对混凝土拌合物的滤水量的影响见图6. 试件1采用水泥为大连小野田 P. I. 52. 5R 硅酸盐水泥, 试件4 为大连小野田 P. O. 42. 5R 硅酸盐水泥.

由图6可以看出, 由于 P. I. 52. 5R 硅酸盐水泥水泥颗粒细、比表面积大, 水化迅速, 因而其累计滤水量小于采用相同配合比的 P. O. 42. 5R 硅酸盐水泥试件的滤水量.

水泥浆的渗透性与水泥浆的粘度有关. 水泥浆的粘度越大, 水泥浆的渗透性越小. 水泥浆的粘度主要与水泥的细度、水泥浓度有关. 在相同水灰比情况下, 随着水泥比表面积增大, 水泥水化速度加快, 水泥活性较大, 水泥浆的粘度相应增大, 混凝土拌合物的渗透量随之降低. 水灰比越小的浆体, 水泥细度对水泥浆的粘度影响越明显.

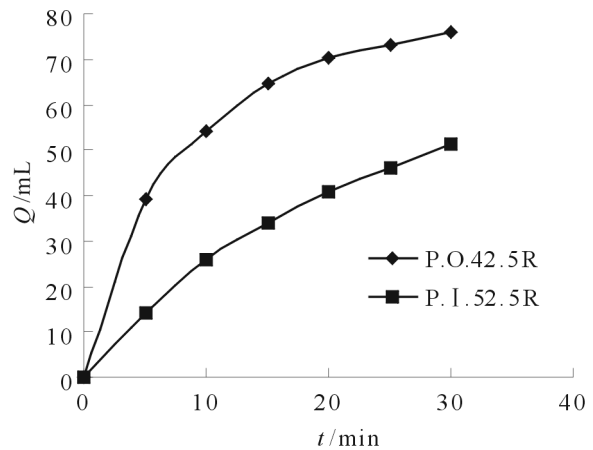


图6 水泥品种对滤水量影响图

Fig.6 Cumulative filtering capacity vs cement variety

### 3 实用电渗滤水方程

文献[2]推导了电渗滤水的一维偏微分理论方程, 该方程形式复杂, 因而有必要对其进一步简化.

对于阴极排水, 阳极不排水的边界条件, 单位面积电渗滤水量在时间上按负指数形式消减.

自由滤水单位面积滤水量与时间的关系可以写成以下简化形式:

$$q_h = Ae^{-at} \tag{1}$$

$q_h$  为自由滤水单位面积排水量 (cm/s),  $t$  为滤水时间 (s).  $A, a$  是与水灰比有关的常数, 随水灰比增大而增大.

由文献[8]可知:

$$q = q_h + q_e = k_h i_h + k_e i_e, q_h = k_h i_h, q_e = k_e i_e$$

$q_h$  为自由滤水单位面积排水量 (cm/s),  $q_e$  为电渗滤水单位面积排水量 (cm/sV/cm).  $q$  为单位面积排水量 (m/s);  $k_h$  为混凝土拌合物的水力渗透系数;  $k_e$  为混凝土拌合物的电渗透系数;  $i_h$  是水头梯度,  $i_h = \frac{grad(H)}{\rho}$ ;  $H$  为水头;  $u$  为超孔隙水压力;  $\rho$  为水的密度;  $i_e$  是电势梯度;  $i_e = grad(\phi)$ ;  $\phi$  是电势.

水在多孔介质中服从达西定律和电流在导电介质中服从欧姆定律, 二者具有相似性. 对于稳定渗流, 两种物理场可用同一形式的数学方程 Laplace 方程来描述, 水的渗流和电渗流存在着可以一一对比的比拟关系.

假设当电压比降为  $i_{e0}$  时, 由电压引起的渗流和由重力引起的渗流量相等, 即

$$q_{e0} = q_h, k_e i_{e0} = k_h i_h, \text{ 则}$$

$$q_e = \alpha k_e i_{e0}, \alpha = \frac{i_e}{i_{e0}} = \beta i_e, \beta = \frac{1}{i_{e0}} = \frac{k_e}{k_h} \frac{1}{i_h}$$

$$\text{因而 } q_e = \beta i_e q_h = \beta i_e A e^{-at}, \text{ 从而, } q = (1 + \beta i_e) A e^{-at} \tag{2}$$

$A, a$  是与水灰比有关的常数, 随水灰比增大而增大. 当  $W/C = 0.7$  时,  $A = 0.0252, a = 0.0004$ ; 当  $W/C = 0.75$  时,  $A = 0.1046, a = 0.0013$ .

$\beta$  是与水灰比有关的常数. 当  $W/C = 0.7$  时,  $\beta = 0.2568$ ; 当  $W/C = 0.75$  时,  $\beta = 0.1382$ .  $\beta$  随水灰比增大而减少, 这是由于随水灰比增大, 电渗滤水量占总滤水量比例相对减少.

当电势梯度  $i_e = 0$  时, 式(2) 即成为由重力引起的自由滤水公式.

由(2) 式可得:

$$Q = \int_0^t q dt = (1 + \beta i_e) \int_0^t A e^{-at} \phi_0 dt = (1 + \beta i_e) \left[ \frac{A}{a} \phi_0 - \frac{A}{a} \phi_0 e^{-at} \right] \tag{3}$$

$Q$  为  $t$  时间内试件的单位面积累计滤水量.  $t < t_1, t_1$  为混凝土拌合物的初凝时间.

由图 7 可以看出,按照(2)式得到的拟合曲线与试验曲线符合良好.

#### 4 电渗滤水混凝土配合比设计

首先根据满足施工要求的流动性确定施工单位用水量. 然后根据混凝土设计强度按下式确定混凝土凝结水胶比<sup>[9]</sup>.

$$R_{28} = AR_c \left( \frac{C + \beta F}{W} + B \right) + aK^2 \quad (4)$$

式中:  $R_{28}$ —电渗滤水混凝土的 28 d 抗压强度;

$R_c$ —水泥实际强度,也可由  $R_c = 1.13 \times f_c$  确定,  $f_c$  为水泥强度等级;

$\frac{C + \beta F}{W}$  为胶水比;

$K$  为灰胶比;

$A, B, a$  为试验常数.

式(4)直接或间接体现了粉煤灰品质( $\beta$ )、粉煤灰掺量(灰胶比)、水胶比、养护龄期(不同龄期的胶凝系数 $\beta$ )以及水泥品种( $R_c$ )对混凝土强度的影响.

根据式(4)可以确定满足强度要求的凝结用水量  $W$ . 施工用水量  $W_0$  减去凝结用水量  $W$  就是需要用电渗技术滤出的累计滤水量  $Q$ . 最后按混凝土拌合物的初凝时间确定电渗滤水时间  $t$ , 根据式(3)计算电渗滤水所需施工电压.

#### 5 结论

(1) 电压的提高,相当于提高了滤水水头,因而电渗滤水速度显著提高. 电渗时,由于水的流动把气泡带走,可以使混凝土更加密实.

(2) 掺 ZnO 后,缓凝效果显著. 由于 ZnO 的缓凝作用,电渗滤水速度远远大于未掺 ZnO 的试件的滤水速度. 这样可以在初凝前完成滤水,以免留下滤水孔道,降低混凝土的强度和耐久性.

(3) 水泥颗粒越细、比表面积越大,水化越迅速,其累计滤水量越小.

#### 参考文献:

- [1] 王立久,李振荣. 建筑材料学[M]. 北京:中国水利水电出版社,2000.
- [2] 王立久,迟耀辉,郑万勇. 电渗滤水混凝土的应用研究[J]. 沈阳建筑大学学报,2006,22(6):939-944.
- [3] 叶肖伟. 电场、渗流场和浓度场耦合作用下污染物在粘土中的迁移机理研究[D]. 杭州:浙江大学,2005.
- [4] L Jared West, Douglas I Stewart, Andrew M Binley, et al. Resistivity Imaging of Electrokinetic Transport in Soil[J]. Journal of Geoenvironmental engineering, ASCE, 1997, 61(4):565-574.
- [5] Shane J Q, Lo K Y. Electrokinetic dewatering of phosphate clay[J]. Journal of Hazardous Materials, 1997, 55(1):117-133.
- [6] 欧孝夺. 岩土工程固结技术用于水体分离[D]. 桂林:广西大学,1998.
- [7] 蒲心诚,叶连生,姚琰,等. 混凝土学[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1981.
- [8] Akram N, Alshawabkeh, Thomas C, et al. Coupling of electrochemical and mechanical processes in soils under DC fields[J]. Mechanics of Materials, 2004, 36:453-465.
- [9] 艾红梅. 大掺量粉煤灰混凝土配合比设计与性能研究[D]. 大连:大连理工大学,2005.

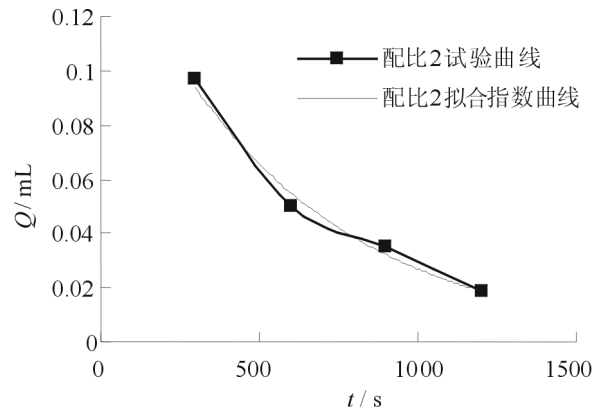


图7 单位时间滤水量随时间变化图

Fig. 7 Filtering capacity per unit of time vs time