

# 电渗脉冲用于混凝土结构抗渗防潮技术

王 冲, 刘焕芹, 林鸿斌, 白 光, 叶建雄

(重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400045)

**摘 要:**混凝土结构的抗渗及防潮一直是土木工程领域需要克服的重要技术难题之一。文章研究了电渗脉冲用于混凝土结构抗渗防潮的影响因素, 包括电渗脉冲电压、混凝土水灰比、液相中离子浓度, 以及脉冲频率等; 模拟测试了电渗脉冲作用下混凝土结构的排水与相对湿度变化。研究表明, 随着脉冲电压升高与混凝土水灰比增大, 电渗脉冲下混凝土渗水量增加;  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  溶液浓度增大时, 电渗脉冲作用下混凝土渗水量增加; 脉冲频率对混凝土渗水量影响不大; 研究亦显示电渗脉冲作用下混凝土排水效果明显, 混凝土相对湿度显著降低。

**关键词:**电渗脉冲; 混凝土; 抗渗防潮

**中图分类号:** TU761.1      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1674-4764(2011)02-0132-05

## Seepage Resistance and Moisture Proof of Concrete Using Electro-osmotic Pulse

WANG Chong, LIU Huan-qin, LIN Hong-bin, BAI Guang, YE Jian-xiong

(School of Materials Science & Engineering, Chongqing University, Chongqing, 400045)

**Abstract:** Seepage resistance and moisture proof of concrete structure is a hard work in civil engineering. The influence factors of seepage resistance and moisture proof of concrete using Electro-Osmotic Pulse (EOP), such as electric voltage, water to cement ratio of concrete, ion concentration in liquid phase, and pulse frequency, were analyzed. Simulating experiment of EOP used to drain water and reduce relatively humidity of concrete structure is executed. The results show that, volume of water seepage is improved due to application of EOP in concrete with increase of electric voltage, W/C of concrete, and concentration of sodium sulfate. And pulse frequency has little effect on volume of water seepage. The results are also presented that effect of dewatering and humidity reducing are remarkable when EOP is applied in concrete structure.

**Key words:** electro-osmotic pulse (EOP); concrete; seepage resistance and moisture proof

水泥混凝土结构的抗渗及防潮一直是土木工程领域需要克服的重要技术难题之一。由于地下结构的渗水, 混凝土易受地下水中化学物质的侵蚀, 加速混凝土内部钢筋的锈蚀, 引起结构劣化, 严重威胁到结构工程的安全性。此外, 建筑结构地面渗水、渗潮, 造成居住环境质量的下降, 并对安装于建筑底层

的大型设备等有一定的腐蚀影响。

目前地下建筑防潮排水的方式主要有涂刷防水涂料法、覆盖防水卷材法、添加防水剂法、应用水泵或除湿装置法及外部排水设施法等<sup>[1]</sup>。这些方法既可在施工初期应用, 也可在工程结束后使用或维修中应用, 各有特点, 但也各有一定的局限性, 如防潮不够彻

收稿日期: 2010-10-04

基金项目: 中央高校基本科研业务费科研专项(CDJZR10130009)资助; 重庆市建委建设科研项目(城科学 2008 第 71 号)

作者简介: 王冲(1972-), 男, 博士, 副教授, 主要从事水泥混凝土材料研究, (E-mail) chongwang@cqu.edu.cn.

底、建筑性能降低、成本高、寿命短、翻修率高等。

电渗脉冲(Electro-osmotic pulse,简称EOP)技术是防潮抗渗的一种新技术。1809年,Reuss发现了电渗现象,即在外加电场作用下,液相在固体孔隙中的移动<sup>[2]</sup>。1939年,德国人Casagrande首次成功地将电渗应用在德国一个铁路路基开挖工程的边坡稳定上,此后他又将该法应用于土建深基坑开挖和铁路路基加固工程<sup>[3]</sup>。1947年,Casagrande开始应用动电技术对粘土进行脱水<sup>[4]</sup>。现在,电渗已在地基加固<sup>[5-8]</sup>、混凝土再碱化<sup>[9]</sup>、降低混凝土水灰比<sup>[10]</sup>等工程中得到广泛研究与应用。

电渗脉冲是在电渗基础上,将电压按照预定的周期,非连续性的施加于电渗电场,在电场阳极、阴极之间产生脉冲电流。多孔材料内若渗有水分,电场作用下即形成水合双电层结构,在电场作用下水分迁移。1998年,美国陆军结构工程研究实验室Vincent Hock等人<sup>[11]</sup>开始研究将电渗脉冲技术用于防止地下混凝土结构与粘土材料的水分渗透,发现这一技术不但阻止水的渗漏效果很好,而且能够降低地下建筑中的空气湿度。研究成果分别于2002—2007年开始公布或发表<sup>[12-16]</sup>。除个别文献<sup>[1]</sup>外,国内对此项技术研究甚少。本研究的目的是研究电渗脉冲技术用于结构混凝土的抗渗防潮影响因素及技术可行性。

## 1 原材料及实验方法

### 1.1 实验用原材料

1.1.1 水泥 使用重庆拉法基水泥厂生产的42.5R普通硅酸盐水泥,其化学成分见表1。

表1 水泥的化学成分 /%

SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	烧失量
22.02	2.65	6.19	58.99	2.53	2.67	3.08

1.1.2 集料 细集料采用岳阳中砂,级配良好,细度模数3.0;粗集料采用歌乐山石灰石碎石,粒径为5~10 mm。

### 1.2 试验方法

1.2.1 混凝土成型与养护 按表2所示配合比称量原材料,强制搅拌、振动成型,静置24 h后脱模,再移至标准养护室养护。试件尺寸为100 mm×100 mm×400 mm。混凝土标准养护28 d待测。

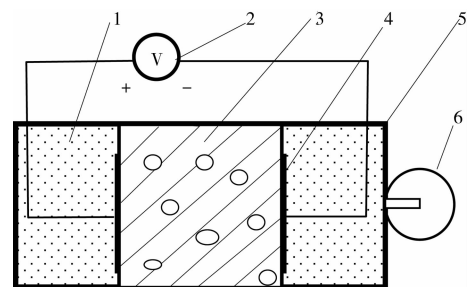
表2 试验混凝土配合比

序号	水灰比	各材料用量/(kg·m <sup>-3</sup> )			
		水泥	中砂	碎石	水
1	0.45	400	600	1200	180
2	0.50	400	600	1200	200
3	0.55	400	600	1200	220

1.2.2 电渗脉冲下混凝土渗水影响因素试验 电渗脉冲渗水试验装置为自制。试验箱采用5 mm厚的玻璃制成,试验箱被平均分割为3个试验仓,各试验仓容积尺寸为100 mm×350 mm×400 mm,以容纳100 mm×100 mm×400 mm的混凝土试件,(试验装置示意图如图1与图2)。安装电极板、连接电源线。试验中确保混凝土与试验箱之间密封,试验箱中加水。待一切准备完毕,即可接通脉冲发生器,调整电压分别至10 V、18 V与25 V进行实验,观测渗水量。



图1 混凝土渗水试验装置



1. 水或溶液;2. 脉冲发生器;3. 混凝土试件;  
4. 电极板;5. 试验箱;6. 渗透水收集装置

图2 混凝土渗水试验装置示意图

1.2.3 脉冲发生器 研究所用脉冲发生器为向重庆迷你科技发展有限公司定制,调压范围0~60 V,试验电压为10~30 V,脉冲频率为10~20 s。配有6个输入输出端口,脉冲波形示于图3。

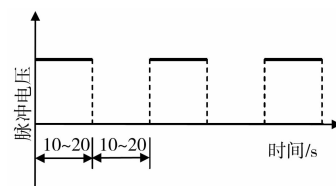


图3 脉冲波形示意图

1.2.4 抗渗防潮模拟试验 研究中自制了电渗脉冲用于混凝土防潮的模拟试验装置。模拟试验箱尺寸为  $600\text{ mm} \times 600\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ 。箱体底部混凝土厚度为  $30\text{ mm}$ 。脉冲发生器阳极接在试验箱中,阴极接在试验箱外部,试验箱外部保持潮湿状态。用塑料薄膜将试验箱密封。将湿度计放入试验箱内部进行湿度监测。试验中另准备一套不加脉冲电压的试验装置以作为对比(如图4所示)。



图4 电渗脉冲下混凝土防潮模拟试验装置

## 2 试验结果及分析

### 2.1 电渗脉冲作用下混凝土渗水量影响因素

2.1.1 不同脉冲电压下混凝土渗水量 研究进行了不同脉冲电压下混凝土渗水量试验。拟定的试验电压分别为  $10\text{ V}$ 、 $18\text{ V}$  和  $25\text{ V}$ ,混凝土水灰比确定为  $0.50$ ,试验中混凝土环境介质为自来水,脉冲频率为  $10\text{ s}$ 。试验共测量了通电  $1\sim 7\text{ d}$  的渗水量,试验结果见图5。

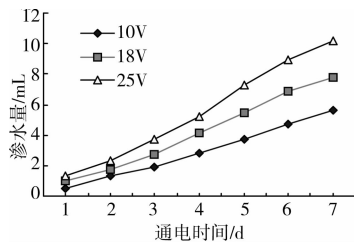


图5 不同脉冲电压下混凝土渗水量

试验结果显示,电渗脉冲作用下,混凝土渗水量与渗水速度都和所施加的电压关系密切,电压越高,混凝土单位时间内渗水量越大,渗水速度越快。当电压由  $10\text{ V}$  增加至  $25\text{ V}$  时,第  $1\text{ d}$  的渗水量由  $0.5\text{ mL}$  增加至  $1.3\text{ mL}$ ,到第  $7\text{ d}$  时,总渗水量已从  $5.6\text{ mL}$  增加至  $10.2\text{ mL}$ 。

试验中还发现,当电压为  $25\text{ V}$  时,由于对水的电解作用增大,阴极端水的减少量明显大于由于电场的作用而渗透至阳极端的水量。

2.1.2 不同离子浓度对渗水量的影响 考虑到实际工程中,地下水并非纯水,而是含有大量化学物

质。例如,中国西南地区地下水中硫酸盐含量较高。因此,进行了电渗脉冲作用下,不同液相环境对混凝土水分渗透的影响研究,拟定的3种液相环境为水、 $5\%$   $\text{Na}_2\text{SO}_4$  溶液和  $10\%$   $\text{Na}_2\text{SO}_4$  溶液。试验中混凝土水灰比为  $0.50$ ,脉冲频率为  $10\text{ s}$ ,测试了电压分别为  $10\text{ V}$ 、 $18\text{ V}$  和  $25\text{ V}$  时  $7\text{ d}$  的渗水量。试验结果见图6。

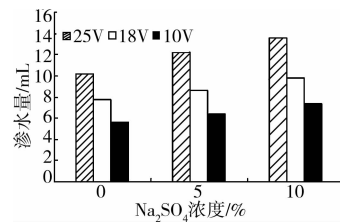


图6 不同离子浓度时混凝土的渗水量

图6显示,在相同水灰比、相同电压作用下,渗水量随  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  溶液浓度的增加而增加。主要原因应该是在电场作用下,除电渗对溶液的迁移有关外,离子在电场作用下的电泳也对溶液迁移有一定影响。在电势差的作用下,水分能够更容易通过混凝土渗出。

同时还可以看出,处于相同环境介质时,随着脉冲电压的增大,渗水量增加。

2.1.3 混凝土水灰比对渗水量的影响 混凝土水灰比不同,混凝土内部孔隙结构大小不一样,水份的迁移与渗透自然也不同。电渗脉冲作用下通电  $7\text{ d}$  的试验结果见图7。试验中电渗脉冲电压为  $10\text{ V}$ ,脉冲频率为  $10\text{ s}$ 。

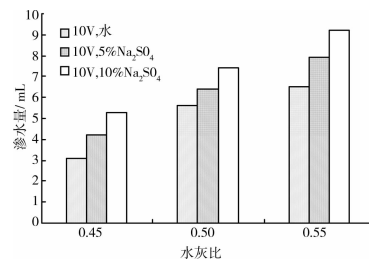


图7 不同水灰比下混凝土渗水量

从图8中可以看出,混凝土的水灰比大小对渗水量影响明显。脉冲电压相同、混凝土环境介质相同情况下,水灰比分别为  $0.45$ 、 $0.50$  和  $0.55$  的混凝土  $7\text{ d}$  总渗水量随着水灰比的增加而增加。这主要是由于水灰比增加,混凝土内部孔隙率增加,电渗作用下混凝土内部水分迁移更加容易,因此渗水量增加。

2.1.4 不同脉冲频率下混凝土的渗水量 液相环境为水,脉冲电压均为  $11\text{ V}$  的情况下,脉冲频率分别为  $10\text{ s}$ 、 $20\text{ s}$  的时混凝土的  $7\text{ d}$  渗水量和  $14\text{ d}$  渗

水量试验结果数据见图8。

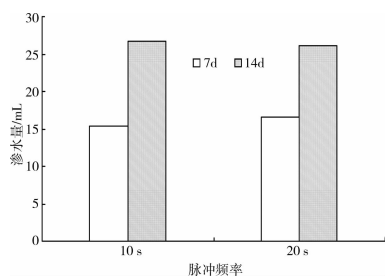


图8 不同脉冲频率下混凝土渗水量

从图8可以看出,在该试验条件下,当液相环境为水,脉冲电压均为11V,脉冲频率分别为10s、20s的情况下,随着脉冲频率的变化,混凝土的渗水量接近。表明脉冲频率对混凝土渗水量影响不大。

## 2.2 电渗脉冲用于混凝土结构抗渗防潮模拟试验

试验中,将数量相同的自来水加入试验箱与对比箱。将模拟试验装置接通电源后,定期记录试验箱中的相对湿度,试验结束后明显可以看出,施加脉冲电压的试验箱中水分已经被排出,试验箱底部干燥,而相同时间、相同环境下的对比箱底部依然有大量水分(这可以从图9左水中窗户的倒影得到证实)。



图9 电渗脉冲下试验箱底部水分排出

图10试验结果亦显示,在脉冲电压为20V,脉冲频率为20s,通电14d的情况下,电渗脉冲技术对模拟地下空间中的湿度有明显的降低作用,混凝土底部的水全部排出,并且空间内的相对湿度从100%降低至76%。这是由于预埋在混凝土中的阳极和预埋在混凝土外部阴极在脉冲变压器的作用下形成电场,将混凝土表面和空气中凝结落下的水分通过试验箱底部的孔排出,从而将水分排出,最终降低了环境的湿度。没有受到电渗脉冲作用的对比箱中混凝土底部一直积水,相对湿度亦一直维持在100%。

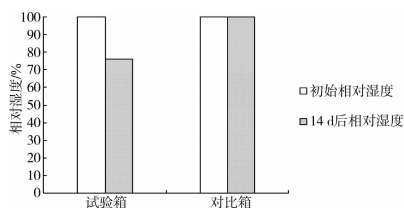


图10 电渗脉冲作用下模拟空间湿度变化

## 3 结论

1) 试验条件下脉冲电压与混凝土水灰比增大,混凝土渗水量增加;电渗脉冲作用下处于 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 溶液环境中的混凝土其渗水量增加,脉冲频率对混凝土渗水量影响不大;

2) 电渗脉冲作用下混凝土排水除湿效果明显,混凝土相对湿度显著降低。

## 参考文献:

- [1] 程丽华, 初元璋, 韩静涛. 地下与半地下建筑电渗脉冲防潮技术初探[J]. 中国建筑防水, 2006(3): 16-18.  
CHENG LI-HUA, CHU YUAN-ZHANG, HAN JING-TAO. Discussion on the electro-osmotic pulse (EOP) technology for basement and semi-basement structure using electro-osmotic pulse [J]. China Building Waterproofing, 2006(3): 16-18.
- [2] KARIM BEDDIAR, TEDDY FEN-CHONG, ANDRE DUPAS, et al. Role of pH in electro-osmosis: experimental study on NaCl-water saturated kaolinite [J]. Transport in Porous Media, 2005, 61: 93-107.
- [3] 王协群, 邹维列. 电渗排水法加固湖相软粘土的试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(2): 95-99.  
WANG XIE-QUN, ZOU WEI-LIE. Experimental research on electro-osmotic consolidation of lacustrine clay [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 29(2): 95-99.
- [4] THIBAUT LEMAIRE, CHRISTIAN MOYNE, DIDIER STEMMELLEN. Modelling of electro-osmosis in clayey materials including pH effects [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2007, 32(1-7): 441-452.
- [5] BERGADO DENNES T, SASANAKUL INTHUORN, HORPIBULSUK SUKSUN. Electro-osmotic consolidation of soft Bangkok clay using copper and carbon electrodes with PVD [J]. Geotechnical Testing Journal, 2003, 26(3): 277-288.
- [6] KARUNARATNE G P, CHEW S H, LIM L H, et al. Electro-osmotic consolidation of soft clay based on laboratory and field trails [C]//Proceeding of the 7th International Geosynthetics Conference. Nice: [s. n.], 2002: 1043-1046.
- [7] PORNPOONG ASAVADORNDEJA, ULRICH GLAWE. Electrokinetic strengthening of soft clay using the anode depolarization method [J]. Bull Eng Geol Environ, 2005, 64(3): 237-245.
- [8] EA IVLIEV. Electro-osmotic drainage and stabilization of soils [J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2008, 45(6): 211-218.
- [9] ANDRADE C, CASTELLOTE M, SARRIA J, et al.

- Evolution of pore solution chemistry, electro-osmosis and rebar corrosion rate induced by realkalisation[J]. *Materials and Structures*, 1999, 32(220): 427-436.
- [10] 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: 自然科学版*, 2006, 22(6): 939-944.  
WANG LI-JIU, CHI YAO-HUI, ZHENG WAN-YONG. Application research on electroosmosis filtering concrete [J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science*, 2006, 22(6): 939-944.
- [11] HOCK V F, MCINERNEY M K, KIRSTEIN E, et al. Demonstration of Electro-Osmotic Pulse Technology for Groundwater Intrusion Control in Concrete Structures [R], *Construction Engineering Research Laboratories*, Champaign, IL, 1998.
- [12] VINCENT HOCK, SEAN MOREFIELD, MICHAEL MCINERNEY, et al. Control of water migration through concrete using electro-osmosis [J]. *Materials Performance*, 2005, 44(7): 42-47.
- [13] MCINERNEY M K, MOREFIELD S, COOPE S, et al. Electroosmotic Pulse (EOP) Technology for Groundwater Intrusion Control in Concrete Structures [R]. *Construction Engineering Research Laboratories*, Champaign, IL, 2002.
- [14] MCINERNEY M K, SEAN MOREFIELD, COOPE S. Electro-Osmotic Pulse (EOP) Technology for Control of Water Seepage in Concrete Structures [R]. 2002.
- [15] HOCK V, MOREFIELD S, BUSHMAN J B, et al. Evaluating the performance of the electro-osmotic pulse basement dewatering system [J]. *Materials Performance*, 2006, 45(1): 24-28.
- [16] HOCK V, MARSHALL O, MCINERNEY M, et al. Electro-osmotic pulse technology for corrosion prevention and control of water intrusion in below grade concrete structures [C]//*Naples Italy: 2nd World Congress on Corrosion in the Military*, 2007.

(编辑 胡英奎)

(上接第125页)

- [12] YAO YANG-PING, HOU WEI & ZHOU AN-NAN. Constitutive model for overconsolidated clays [J]. *Sci China Ser E-Tech Sci*, 2008, 52(2): 179-191.
- [13] 徐连民, 朱合华, 中井照夫, 等. 超固结粘土的剪切带数值模拟 [J]. *岩土力学*, 2006, 27(1): 61-66.  
XU LIAN-MIN, ZHU HE-HUA, NAKAI TERUO, etc. Numerical simulation of shear band in over-consolidated clay [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(1): 61-66.
- [14] 张永兴, 郑智能, 刘元雪. 考虑两种不同性质超固结的土体本构模型 [J]. *土木建筑与环境工程*, 2010, 32(1): 1-3.  
ZHANG YONG-XING, ZHENG ZHI-NENG, LIU YUAN-XUE. A constitutive model for structured clays based on two different types of overconsolidation [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2010, 32(1): 1-3.
- [15] 孔亮, 张鲁渝, 郑颖人. 两种土体弹塑性模型三维化方法的比较研究 [J]. *岩土工程学报*, 2002, 24(4): 123-125.  
KONG Liang, ZHANG LU-YU, ZHENG YING-REN. Study on two three-dimensional methods of elasto-plastic model for soil [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2002, 24(4): 123-125.
- [16] 张锋. *计算土力学* [M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [17] BOUKPETI N, DRESCHER A. Triaxial behavior of refined superior sand model. [J] *Computers and Geotechnics*, 2000, 26: 65-81.
- [18] LOUDON P A. Some deformation characteristics of kaolin [D]. Ph. D. Thesis, Cambridge University, 1967.

(编辑 胡玲)