

海港工程混凝土电通量和 RCM 扩散系数相关性研究

杨清泉 王颖

(中交一航局第三工程有限公司, 辽宁 大连 116000)

【摘要】 本文通过大量试验数据探索出电通量法和 RCM 法的相关性,在实际工程中,采用一种方法的测试数据推算另一种方法数据,在一定程度上节省人力、物力,避免重复试验。因此建立混凝土抗氯离子渗透性能电通量法和抗氯离子扩散系数之间的相互关系十分必要。

【关键词】 电通量法; RCM 法; 相关性; 海港工程

中图分类号: TV431

文献标志码: A

文章编号: 1005-4774(2017)06-0042-06

Research on correlation between concrete electric flux and RCM diffusion coefficient in harbor projects

YANG Qingquan, WANG Ying

(No. 3 Engineering Company Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Company Ltd., Dalian 116000, China)

Abstract: In the paper, the correlation of electric flux method and RCM method is explored through a large number of experimental data. The experimental data of one method is adopted for deducing the data of another method in actual projects, and the method can save manpower and material resources to certain extent, and avoid repeated trials. Therefore, it is very necessary to establish the mutual relationship between concrete chloride ion penetration resistance electric flux method and chloride ion diffusion resistance coefficient.

Keywords: electric flux method; RCM method; correlation; port works

1 引言

随着混凝土跨海大桥和海港工程的日益增多,混凝土的耐久性难题逐渐凸显。海港工程混凝土由于长期处于恶劣的海洋环境中,受到海水各种盐类侵蚀,尤其是海水中氯离子对混凝土的侵蚀,进而引起混凝土中钢筋腐蚀,导致混凝土结构的耐久性下降,严重威胁混凝土的正常使用寿命。中国东北部地区三面环海,海港工程较多,对混凝土抗氯离子性能有较高的要求。

混凝土抗氯离子渗透性能的测试方法很多,目前在很多工程中都要求同时采用电通量法和 RCM 扩散系数法分别评价混凝土的抗氯离子渗透性能。两种试验方法各有特点,笔者认为,如果能够通过大量的试验数据探索出电通量法和 RCM 法的相关性,在实际工程中,用一种方法的测试数据推断另一种方法的数据,可以在一定程度上节省人力、物力,避免重复试验。所以,建立混凝土抗氯离子渗透性能电通量法和抗氯离子 RCM 扩散系数之间的相互关系十分必要。

2 试验方法简介

目前,国内测试混凝土抗氯离子性能试验方法大致可以概括为慢速法、快速法和其他方法^[1]。

慢速法最初采用浸泡法或扩散槽法。浸泡法是指经过一定时间的浸泡或扩散,通过测量混凝土试件不同深度的氯离子含量来计算混凝土中氯离子迁移速度。扩散槽法是指通过计算测量槽中溶液浓度的变化来计算氯离子的传输速度。这两种方法试验周期长,影响试验结果的因素较多,在工程中缺少实际应用价值。

快速法是近些年各国研究人员开发研究的,在短时间内获得混凝土抗氯离子渗透性能的试验方法。通过采取以下几种措施来快速测定氯离子在混凝土中的渗透性:①施外加电场;②测量混凝土试块在保水(盐)情况下的电化学指标(电导率、电阻率、电通量等);③增加溶液水头或压力。快速试验方法虽然与氯离子在混凝土中真实的扩散过程有所差异,但在一定范围内与实际情况具有良好的一致性,省时省力,易于操作,目前在行业内得到一致认可。其中常用的几种典型的快速测试方法包括:电通量法、电迁移法、RCM 法、NTB 法、NEL 法、交流阻抗谱法和渗透压力法等。

此外,近些年来一些研究还提出几种新的试验方法,如气体扩散法、吸收率法、异丙醇替代法等,均取得初步成果,笔者在此不一一叙述。

从对混凝土配合比筛选和质量控制等角度来看,电通量法、RCM 法是切实可行的。结合设备情况和工作实际,通常采电通量法和 RCM 法来评价混凝土的抗氯离子性能。其中,电通量试验方法参照(JTS 202-2—2012)《水运工程混凝土质量控制标准》附录 A^[2]。RCM 扩散系数试验方法参照(JTS 257-2—2012)《海港工程高性能混凝土质量控制标准》附录 B^[3]。

电通量法最早由美国硅酸盐水泥协会的 Whiting 提出,基本原理是利用外加电场加速试件两端溶液离子迁移速度,在直流电作用下,溶液中离子能够快速渗透,向正极方向移动,测量一定时间内通过的电量即可反映该混凝土试件的抗氯离子渗透能力。试验采用直

径 $95 \pm 2\text{mm}$ 、厚度 $51 \pm 3\text{mm}$ 的素混凝土试件或芯样,在标准条件下养护 28d 或 90d 后,暴露于空气中至其表面干燥,并以硅橡胶或树脂密封材料施涂于试件侧面,必要时填补涂层中的孔洞。在测试前,进行真空保水。保水完成后,将试件安装于试验槽内,用橡胶密封环或其他密封胶密封,用螺杆将两试验槽和试件夹紧;将试验装置放在 $20^\circ\text{C} \sim 23^\circ\text{C}$ 的流动冷水槽中,使水面低于装置顶部 5mm。在试件两端施加 60V 直流恒电压,两端容器中的溶液分别为 0.3mol/L 的 NaOH(正极)和 3.0% 的 NaCl(负极),试验持续 6h,测定通过混凝土试件的总电量。该试验方法不适用于掺亚硝酸盐和钢纤维等良导电材料的混凝土。

试验装置示意图如图 1 所示,试验槽结构如图 2 所示,试验仪器如下页图 3 所示。

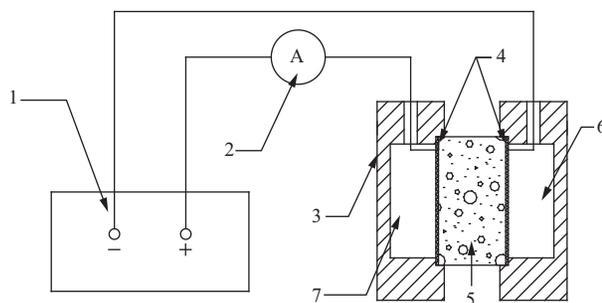


图 1 试验装置示意图

1-直流稳压电源;2-电流表;3-试验槽;4-紫铜垫板和铜网;
5-混凝土试件;6-3% NaCl 溶液;7-0.3mol/L NaOH 溶液

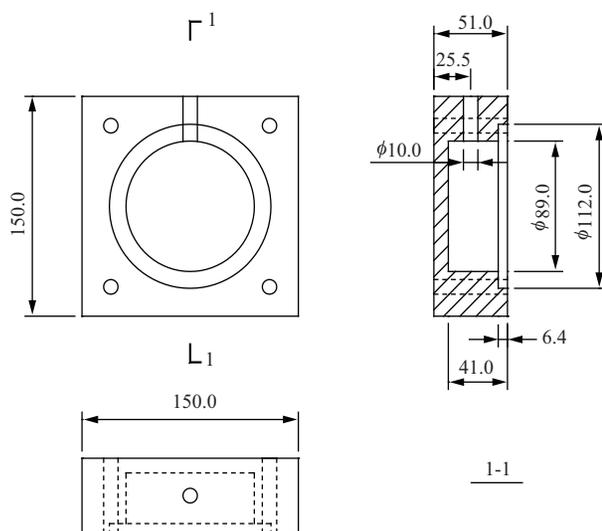


图 2 试验槽结构（单位:mm）



图3 电通量法试验仪器(混凝土渗透性快速测定仪)

氯离子扩散系数快速测定法即 RCM 法 (rapid chloride migration test), 最早由唐路平^[4]教授提出, 后被北欧定为标准方法。该方法通过给混凝土施加一外加电场, 加速氯离子在混凝土中迁移速度, 测定一定时间内氯离子在混凝土中渗透深度, 结合 Nernst-Plank 方程计算氯离子在混凝土中的扩散系数。试验需要制作直径 100mm、厚度 100mm、骨料最大粒径不大于 25mm 的混凝土试件, 或对硬化混凝土钻芯取样。达到龄期后, 切成两个直径 100mm、厚度 50mm 的圆柱形试件, 清洗表面, 在空气中暴露至表面干燥后, 抽真空处理, 介质为饱和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 。待真空处理结束后, 将试件塞进橡胶套筒内, 并放入电解质水槽中。阴极电解质水槽中为 10% 的 NaCl 溶液, 阳极橡胶套筒内为 0.3mol/L 的 NaOH 溶液。施加回路电压 30V, 确定试验时间。通电结束后, 用试验机将试块沿轴向劈裂成两半, 在新劈裂的断面喷涂 0.1mol/L 的 AgNO_3 溶液, 放置 15min, 用游标卡尺测量白色 AgCl 标示的渗透深度, 计算出该混凝土试块的扩散系数。

试验装置如图 4 所示, RCM 法试验仪器如图 5 所示。

3 试验数据与分析

3.1 试验用原材料

a. 水泥采用某 P·O 42.5 水泥, 产地 A。P·O 42.5 水泥指标见下页表 1。

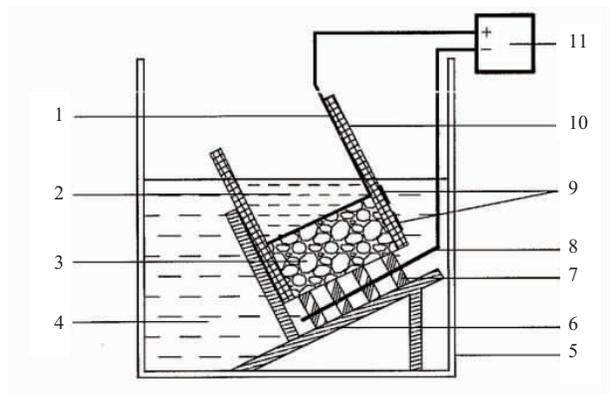


图4 RCM 法试验装置示意图

- 1-阳极;2-阳极溶液;3-试件;4-阴极溶液;5-电解质水槽;
6-有机玻璃支架;7-阴极架;8-阴极;9-不锈钢管卡;
10-橡胶套筒;11-直流稳压电源



图5 混凝土扩散系数测定仪

- b. 细集料采用河沙, 产地 B。河沙指标见表 2。
- c. 粗集料采用碎石, 产地 C。碎石指标见表 3。
- d. 粉煤灰采用 C 家生产的 I 级灰。粉煤灰指标见表 4。
- e. 矿渣粉采用 D 家生产的 S95 级矿渣粉。矿渣粉指标见表 5。
- f. 水采用饮用水。用水指标见表 6。
- g. 减水剂采用 F 家生产的聚羧酸高性能减水剂 SW-A。
- h. 引气剂采用 E 家 PC-2 型松香热聚物引气剂。

3.2 试验数据

试验分别选取 0.30、0.32、0.34、0.35 和 0.36 五种

表1 P·O 42.5 水泥指标

等级	标准稠度用水量/%	安定性	初凝时间/min	终凝时间/min	3d 抗折强度/MPa	28d 抗折强度/MPa	3d 抗压强度/MPa	28d 抗压强度/MPa
P·O 42.5	27.9	合格	180	245	5.9	8.6	30.9	53.1

表2 河沙指标

细度模数	表观密度/(kg/m ³)	堆积密度/(kg/m ³)	总含泥量/%	泥块含量/%	孔隙率/%	氯离子含量/%
2.8	2600	1420	1.0	0.2	45	0

表3 碎石指标

公称粒径/m	最大粒径/mm	表观密度/(kg/m ³)	堆积密度/(kg/m ³)	总含泥量/%	泥块含量/%	孔隙率/%	压碎指标值/%
5~25	25	2720	1410	0.5	0	48	8.4

表4 粉煤灰指标

等级	细度/%	烧失量/%	需水量比/%	SO ₃ /%	含水量/%	氯离子含量/%	碱含量/%
I 级	4.6	0.8	91	1.0	0.1	0.02	1.40

表5 矿渣粉指标

等级	密度/(g/cm ³)	比表面积/(m ² /kg)	流动度比/%	含水量/%	7d 活性指数/%	28d 活性指数/%	氯离子含量/%	碱含量/%
S95	2.88	415	101	0.1	75	99	0.02	0.55

表6 用水指标

pH 值	氯离子含量/(mg/L)	硫酸盐含量/(mg/L)	可溶物/(mg/L)	不溶物/(mg/L)
7.6	15.0	57.2	175.1	14.0

水胶比,采集不同粉煤灰、矿渣粉掺量的 28d、56d 和 90d 三个龄期的电通量及扩散系数数据,具体数据由于篇幅所限,在此略去。

3.3 数据分析

对不同水胶比和不同龄期的电通量、扩散系数进行初步整理归纳,见表 7。

表7 整理数据

水胶比	龄 期	28d	56d	90d
0.30	电通量平均值/C	654.4	506.3	299.0
	扩散系数平均值/($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{S}$)	2.53	1.67	0.75
0.32	电通量平均值/C	741.1	555.2	328.6
	扩散系数平均值/($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{S}$)	2.57	1.68	0.82
0.34	电通量平均值/C	753.7	573.9	360.7
	扩散系数平均值/($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{S}$)	2.64	1.75	0.94
0.35	电通量平均值/C	797.9	577.1	366.2
	扩散系数平均值/($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{S}$)	2.67	1.84	0.95
0.36	电通量平均值/C	804.9	582.5	381.5
	扩散系数平均值/($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{S}$)	2.72	1.89	1.06

对表7 试验数据进行初步分析,得到如图6~图9所示的结论。

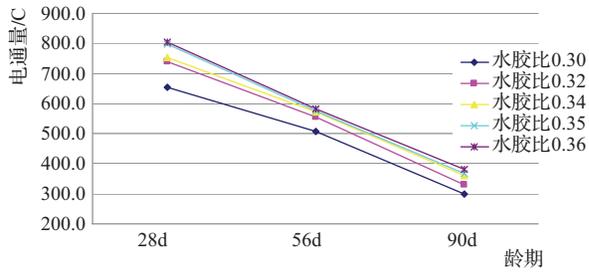


图6 相同水胶比情况下电通量随龄期变化

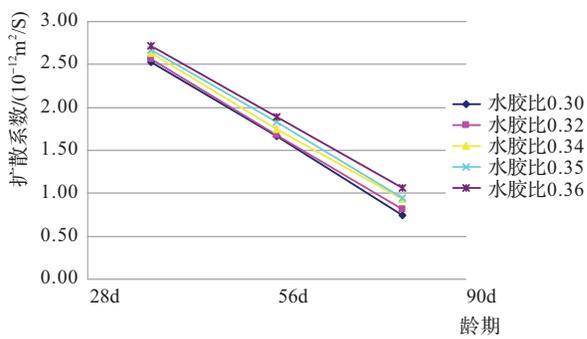


图7 相同水胶比情况下扩散系数随龄期变化

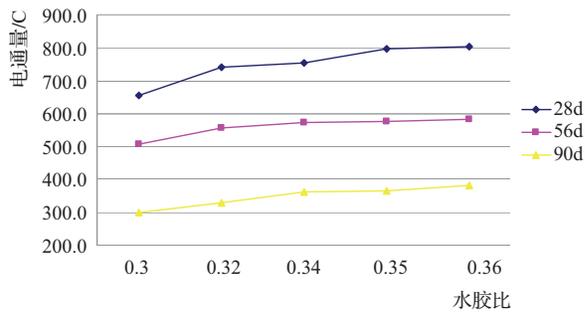


图8 相同龄期情况下电通量随水胶比变化

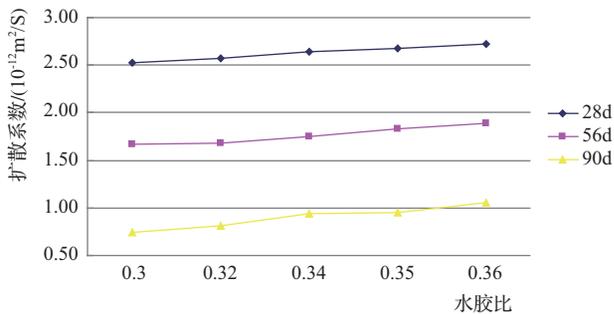


图9 相同龄期情况下扩散系数随水胶比变化

对不同水胶比、龄期的电通量以及扩散系数数据进行回归分析,得到如图10~图13所示的结论。

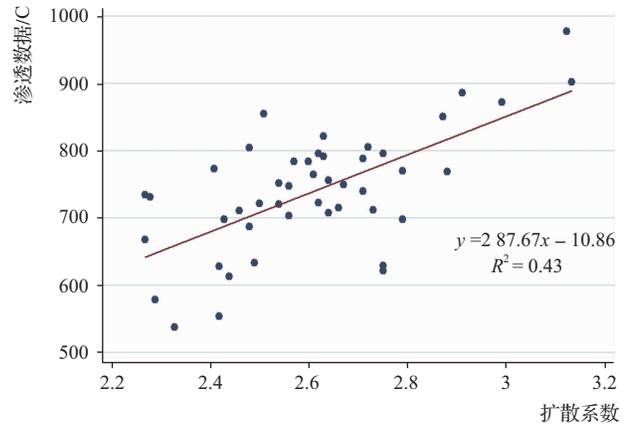


图10 混凝土试块 28d 龄期电通量与扩散系数关系

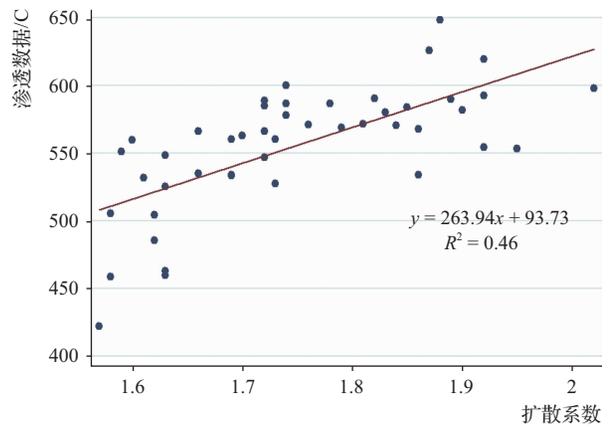


图11 混凝土试块 56d 龄期电通量与扩散系数关系

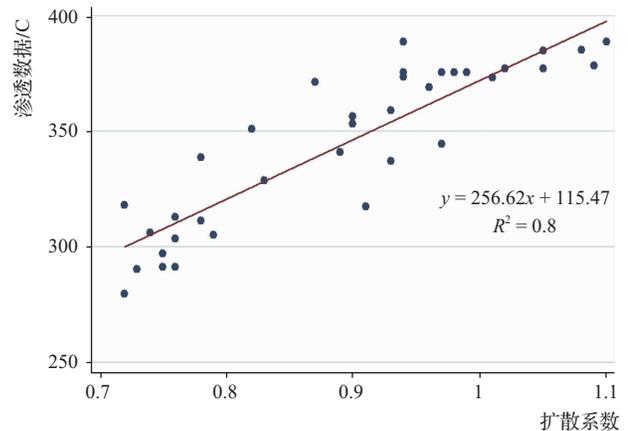


图12 混凝土试块 90d 龄期电通量与扩散系数关系

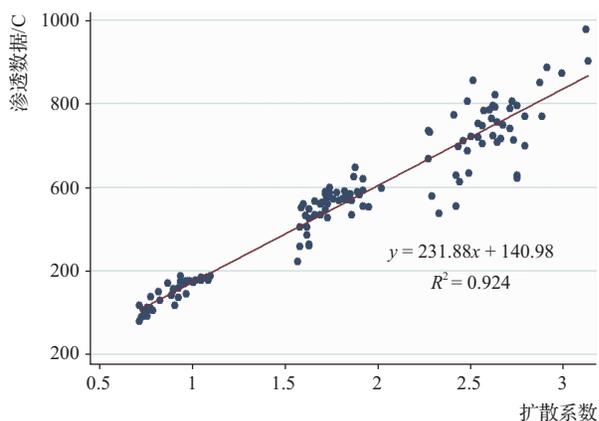


图13 混凝土试块所有龄期电通量与扩散系数关系

4 结论分析

4.1 龄期对混凝土抗氯离子性能的影响

从图6和图7所示曲线可以看出,在水胶比不变情况下,混凝土电通量与扩散系数均随着龄期的增大而减小。这说明随着龄期增长,混凝土内部更加密实,抵抗氯离子渗透能力加强。

4.2 水胶比对混凝土抗氯离子性能的影响

水胶比是影响电通量与扩散系数的重要因素,从图8和图9所示曲线可以看出,在同一龄期下,水胶比越大,对应的混凝土电通量和扩散系数均呈增大趋势。

4.3 电通量与扩散系数的相关性

通过对所有数据相关分析,希望得到电通量和扩散系数两者之间的关系,探索衡量混凝土抗氯离子性能两种方法的相关程度,并用一条直线来近似表示两者的相关性。

(上接第34页)意两个方面,一是要选择合理的防渗组合方案;二是要注意结合部位的有效衔接,以形成封闭性的防渗体系。在此基础上可结合数值计算,对防渗方案的可行性进行验证,保证施工设计方案合理有效。◆

参考文献

- [1] 张天明,苏红兵. 滑坡堆积体上坝基防渗处理设计研究[J]. 土木工程学报,2005(4):129-133.
- [2] 谢庆明,乔秀笙. 爆破堆石坝体造孔混凝土防渗墙试验槽段设计探讨[J]. 中国农村水利水电,2015(7):116-120.
- [3] 彭国新. 河壩水库大坝坝基帷幕灌浆设计[J]. 水利规划与设计,2009(2):71-73.

如图10所示,得到28d龄期下电通量和扩散系数的回归方程为 $y = 287.67x - 10.86$;确定系数 R^2 为0.43。

如图11所示,得到56d龄期下电通量和扩散系数的回归方程为 $y = 263.94x + 93.73$;确定系数 R^2 为0.46。

如图12所示,得到90d龄期下电通量和扩散系数的回归方程为 $y = 256.62x + 115.47$;确定系数 R^2 为0.80。

如图13所示,得到所有龄期的电通量和扩散系数的回归方程为 $y = 231.88x + 140.98$;确定系数 R^2 为0.92。

从图中可以看出,龄期为90d的数据在图表中较为集中,龄期为56d的较为分散,龄期为28d的更为分散。而从确定系数来看,图12中所示曲线的确定系数 R^2 为0.80,拟合程度较高。图13所有数据综合曲线确定系数 R^2 为0.92,方程中变量 x 对 y 的解释度达92.4%。解释度越高,方程越有意义。

由此,笔者建议,对于已知两种评价方法中任意一种数据,可以通过此方程来推断另一种试验方法数据,为评价混凝土抗氯离子性能提供有效的参考和依据。◆

参考文献

- [1] 冷发光,田冠飞. 混凝土抗氯离子渗透性试验方法[J]. 东南大学学报(自然科学版),2006(S2).
- [2] JTS 202-2—2012 水运工程混凝土质量控制标准[S]. 北京:人民交通出版社,2011.
- [3] JTS 257-2—2012 海港工程高性能混凝土质量控制标准[S]. 北京:人民交通出版社,2012.
- [4] Tang L, Nilsson L. Chloride diffusivity in high strength concrete [J]. Nordic Concrete Research, 1997, 27(2):293-302.
- [4] 曹群. 八宝海水库基础帷幕灌浆设计优化[J]. 水利规划与设计,2008(1):62-63.
- [5] 徐利君. 白石水库坝基帷幕灌浆设计分析[J]. 东北水利水电,2002(6):21-22.
- [6] 依沙克·胡吉. 下坝地水库大坝心墙与防渗墙连接方案比选与效果分析[J]. 水利科技与经济,2015(7):57-58.
- [7] 张慧萍,赵迪,梁越. 金佛山沥青混凝土心墙坝二维渗流计算分析[J]. 地下空间与工程学报,2014(2):449-454.
- [8] 陈守开,刘尚蔚,郭利霞,等. 中、小型土石坝渗流场三维有限元分析方法及应用[J]. 应用基础与工程科学学报,2012(4):612-621.
- [9] 周灿,刘美智,李中林,等. 混凝土防渗墙施工质量控制要点及事故预防[J]. 人民长江,2010(11):57-59.