

# RCM 法与 ASTM C1202 法的相关性研究

钱刚<sup>1</sup>,姚志雄<sup>2</sup>

(1.厦门路桥翔通股份有限公司,福建 厦门 361101;2.厦门大学建筑与土木工程学院,福建 厦门 361005)

**摘要** 对评价混凝土抗氯离子渗透性能的2种测试方法—非稳态快速氯离子电迁移测定法(RCM法)与美国库仑电量法(ASTM C1202)进行了研究,探讨了二者之间的相关性。研究表明:氯离子扩散系数随着电通量的增大而增大,对于组分相同或掺同种矿物掺合料的混凝土而言,它们之间的相关性非常好。当矿物掺合料为粉煤灰时,氯离子扩散系数与电通量之间呈非线性关系;当矿物掺合料为矿粉或硅灰时,氯离子扩散系数与电通量之间呈线性关系。

**关键词** 混凝土;渗透性;RCM法;ASTM C1202

Experimental study on comparison between the RCM and ASTM C1202 testing method for chloride ion permeability in concrete

QIAN Gang<sup>1</sup>, YAO Zhi-xiong<sup>2</sup>

(1.Xiamen R & B Sunstone CO., LTD, Xiamen Fujian 361101; 2.College of Architecture and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China)

**Abstract:** The concrete's electric flux and chloride diffusion coefficient of concrete are studied by the test as designated in RCM test and ASTM C1202, in order to appraise the concretes anti-chloride penetrating. It is showed that, the chloride diffusion coefficient increases along with the electric flux increases. Their relevance is good when the concretes' components are the same or the concretes mixed homogeneous admixture. It is nonlinear relationship if the admixture is fly ash. It is linear relationship if the admixture is slag or silica fume.

**Key words:** concrete; permeability; RCM method; ASTM C1202

## 0 引言

处于氯盐侵蚀环境下的混凝土结构,如跨海大桥、海港工程结构、盐碱地区混凝土结构等,由于氯离子渗入到混凝土中导致钢筋锈蚀,引起混凝土开裂,使混凝土结构过早破坏,降低了结构的使用寿命。因此,氯离子渗透引起混凝土结构破坏已成为普遍关注并日益突出的一大公害,而如何通过准确、快捷的方法测量混凝土中氯离子渗透程度是混凝土界面临的重要课题。迄今为止,国内外研究者提出了多种氯离子渗透扩散性试验方法<sup>[1]</sup>。以 ASTM C1202(American Society for Testing and Materials)为基础的试验方法是目前国内外常用的一种试验方法。该方法试验周期短,操作简便,但由于在测定混凝土的电通量之前,应首先建立被测混凝土的电通量与长期氯盐浸泡混凝土性能之间的相互关系。氯盐浸泡试验所需周期很长,试验过程比较复杂。RCM法(Rapid chloride migration method)能快速测定,直接根据氯离子侵入混凝土深度的测定值来导出扩散系数,而不是通过电量、电阻或电导的测定,优点较多,有被国际广泛采用的趋向,为北欧标准 NT Build492 采用<sup>[2]</sup>。用 RCM 法的测定的早期混凝土的扩散系数与氯盐浸泡拟合求出的氯离子扩散系数之间有较好的相关性,而且数值上相当接近。但相对于 ASTM C1202,RCM 法周期较长,且影响试验结果的人为因素较多<sup>[3]</sup>。

在实际应用中一般单独使用其中一种方法,很少同时使用并且研究它们之间的共同点或对应关系。例如:厦门的集美大桥、杏林公路铁路两用桥采用 ASTM C1202 测定的扩散

系数作为耐久性控制指标,厦门翔安海底隧道采用 RCM 法测定的扩散系数作为耐久性控制指标。国内一些研究者对包括 ASTM C1202 和 RCM 法在内的氯离子渗透性试验方法从理论和试验上进行了分析对比<sup>[4-6]</sup>,但结论并不一致。如果能够建立混凝土电通量与氯离子扩散系数之间的相互关系,就可以用其中一种方法测出的数据知道另外一种方法的数据,这样就可以避免重复试验,节约时间和人力;而且工程人员查看采用不同测试方法的文献时,可以利用这一相互关系对其中数据进行比较,对实际工程起到参考作用。因此,本文同时采用 2 种方法对掺入不同矿物掺合料的混凝土试件进行氯离子渗透试验,通过分析比较,建立起二者之间的关系。

## 1 试验原材料和试验方法

### 1.1 试验原材料

- (1)水泥:福建建福 P.O42.5 水泥;
- (2)粉煤灰:漳州后石电厂生产的 I 级粉煤灰;
- (3)矿粉:厦门科之杰生产的 S95 矿渣粉;
- (4)硅灰:成都蓝星科技发展有限公司生产的硅灰,比表面积为 2200cm<sup>2</sup>/g;
- (5)石子:厦门海沧的碎石,其粒径为 5~25mm 连续级配;
- (6)砂:漳州九龙江河砂,砂的细度模数为 2.64,属中砂 II 区;
- (7)水:自来水。

### 1.2 试验方法

(1)RCM 法。参照德国 Aachen 工业大学建筑材料研究所提出的氯离子电迁移快速试验方法。试验室制作 150mm×150mm×150mm 的试块,试验前 4d 从标养室中取出试块进行取芯,端面磨平,制成 100mm×50mm 的试件,再放入标养室中水养至试验龄期。试验安装前对试件进行 15min 超声浴,试验时试件两端外加 30V 电压,试件的正负极分别浸入在 0.2mol/L 的 KOH 溶液和含 5%NaCl 的 0.2mol/L KOH 溶液中,根据初始电流确定通电时间。通电完毕,取出试件,在压力机上将其劈成两半,并在劈开的试件表面喷涂 0.1mol/L 的 AgNO<sub>3</sub> 溶液,测量氯离子渗透深度,计算氯离子扩散系数 D。RCM 法评价混凝土渗透性的参考标准如表 1。

表 1 RCM 方法评价混凝土渗透性参考标准

氯离子扩散系数/(m <sup>2</sup> /s)	抗氯离子渗透性
D<2×10 <sup>-12</sup>	抗氯离子渗透性能非常好
D<8×10 <sup>-12</sup>	抗氯离子渗透性能较好
D<16×10 <sup>-12</sup>	抗氯离子渗透性能一般
D>16×10 <sup>-12</sup>	不适用于严酷环境

(2)ASTM C1202。按照 ASTM C1202,在规定的试验龄期前,对制备的试块进行钻芯取样,端面磨平,制成 100mm×50mm 的圆柱体试件。试验前对试件进行真空饱水,试验时在试件轴向施加 60V 直流电压,试件的正、负极两侧的试验槽内分别放置浓度为 0.3N 的 NaOH 溶液和 3%的 NaCl 溶液。记录 6h 内通过试件的总电量 Q 值即为试件的电通量。ASTM C1202 法评价混凝土渗透性的参考标准如表 2。

表 2 ASTM C1202 方法评价混凝土渗透性参考标准

通电量/库仑	氯离子渗透性
>4000	高
2000~4000	中
1000~2000	低
100~1000	非常低
<100	可忽略不计

## 2 试验内容与结果分析

### 2.1 试验内容

电通量与扩散系数均为反映混凝土内部孔结构的数量和特征的指标,因此它们之间存在一定的相关关系。为了了

解和建立这种关系,开展了掺不同矿物掺合料的混凝土试验,试验方案和检测结果如表 3 和表 4 所示。

表 4 各组混凝土抗氯离子渗透性能检测结果

编号	电通量/库仑 (ASTM C1202 法)		氯离子扩散系数 /×10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s (RCM 法)					
	28d	90d	28d		90d			
1	2215	1657	5.73		4.14			
	2232	2228	1661	1662	5.80	5.80	4.21	4.20
	2237		1668		5.87		4.25	
2	1470		1153		4.12		2.96	
	1475	1475	1156	1155	4.14	4.15	3.02	3.00
	1480		1156		4.19		3.02	
3	900		863		3.27		2.81	
	906	905	864	865	3.29	3.30	2.84	2.85
	909		868		3.34		2.90	
4	396		360		2.24		1.74	
	398	399	358	360	2.26	2.25	1.80	1.80
	403		362		2.25		1.86	
5	410		386		2.16		1.64	
	413	412	386	388	2.19	2.20	1.64	1.65
	413		392		2.25		1.67	
6	815		754		2.84		1.95	
	817	818	756	759	2.85	2.85	2.00	2.00
	822		767		2.86		2.05	
7	693		646		2.37		1.83	
	695	695	651	650	2.39	2.40	1.85	1.85
	697		653		2.44		1.87	
8	473		407		2.22		1.54	
	475	474	409	409	2.26	2.25	1.56	1.55
	474		411		2.27		1.55	
9	476		395		2.13		1.19	
	477	478	399	398	2.14	2.15	1.21	1.20
	481		400		2.18		1.20	
10	513		444		2.73		1.93	
	516	515	446	446	2.75	2.75	1.96	1.95
	516		448		2.77		1.96	
11	476		412		2.65		2.08	
	480	479	414	415	2.85	2.80	2.10	2.10
	481		419		2.90		2.12	

表 3 混凝土配合比方案

编号	水胶比	配合比 (C:S:G)	砂率 /%	混凝土材料用量/(kg/m <sup>3</sup> )						
				水	水泥	粉煤灰	矿粉	硅灰	砂	石
1	0.36	1:1.31:1.51	46	201.6	560	0	0	0	733.6	845.6
2	0.36	1:1.26:1.50	46	201.6	392	168	0	0	705.6	840
3	0.36	1:1.24:1.48	46	201.6	336	224	0	0	694.4	828.8
4	0.36	1:1.25:1.49	46	201.6	368.5	157.9	0	33.6	700	834.4
5	0.36	1:1.24:1.47	46	201.6	315.8	210.6	0	33.6	694.4	823.2
6	0.36	1:1.29:1.53	46	201.6	336	0	224	0	722.4	856.8
7	0.36	1:1.29:1.53	46	201.6	280	0	280	0	722.4	856.8
8	0.36	1:1.28:1.52	46	201.6	315.8	0	210.6	33.6	716.8	851.2
9	0.36	1:1.28:1.52	46	201.6	263.2	0	263.2	33.6	716.8	851.2
10	0.34	1:1.3:1.55	46	201.6	537.6	0	0	22.4	728	868
11	0.34	1:1.3:1.54	46	201.6	526.4	0	0	33.6	728	862.4

2.2 结果分析

由表1和表2可知,按掺合料的掺入方式不同可以分成单掺粉煤灰、双掺粉煤灰和硅灰、单掺矿粉、双掺矿粉和硅灰、单掺硅灰混凝土五种类型,分别进行28d和90d的电通量和扩散系数之间的关系分析,对以上各数据进行曲线拟合试验,拟合结果如图1~图10,其中,x为电通量,y为氯离子扩散系数值。

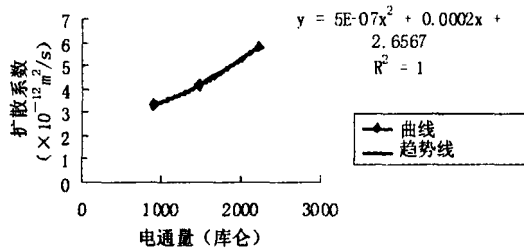


图1 掺粉煤灰电通量与扩散系数的关系(28d)

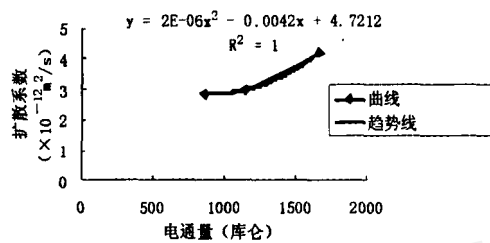


图2 掺粉煤灰电通量与扩散系数的关系(90 d)

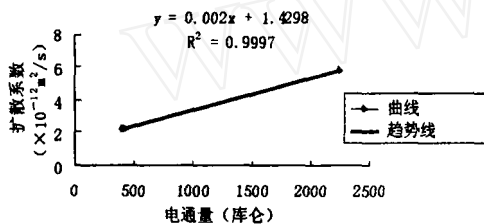


图3 掺粉煤灰和硅灰时电通量与扩散系数的关系(28 d)

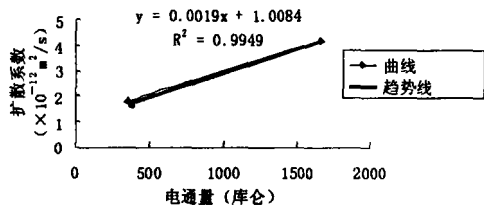


图4 掺粉煤灰和硅灰时电通量与扩散系数的关系(90 d)

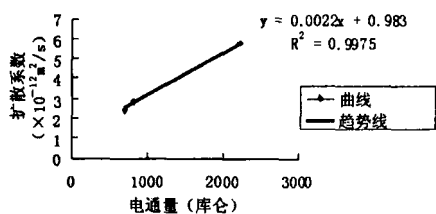


图5 掺矿粉电通量与扩散系数的关系(28 d)

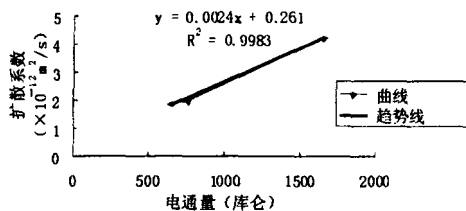


图6 掺矿粉电通量与扩散系数的关系(90 d)

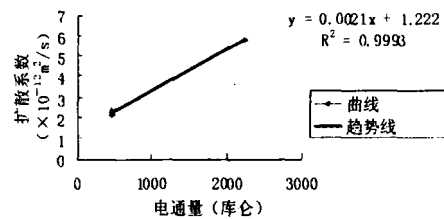


图7 掺矿粉硅灰时电通量与扩散系数的关系(28 d)

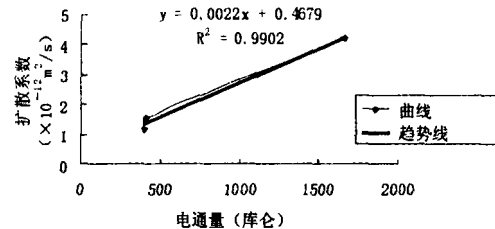


图8 掺矿粉和硅灰时电通量与扩散系数的关系(90 d)

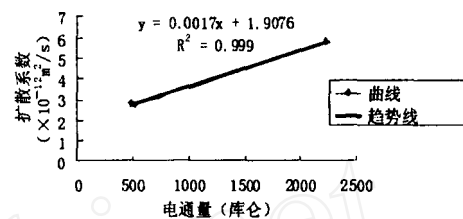


图9 掺硅灰电通量与扩散系数的关系(28 d)

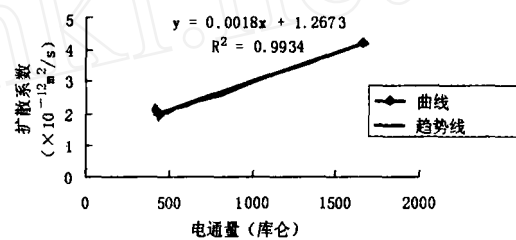


图10 掺硅灰电通量与扩散系数的关系(90 d)

由图1~图10可看出,相同水胶比条件下,空白混凝土的氯离子扩散系数远远高于其余各组混凝土,说明混凝土的氯离子扩散系数随着粉煤灰、矿粉及硅灰的掺入而降低,其中硅灰的作用最为明显。而矿物掺合料的双掺效果普遍较单掺好。众所周知,粉煤灰、矿粉及硅灰都具有一定活性,通过火山灰效应、填充密实效应与微集料效应,不仅优化了水化产物组成,而且改善了混凝土的微观结构,因此具有增强、提高耐久性作用。文献[7]认为,单掺硅灰、粉煤灰、矿渣超细粉均明显改善混凝土的抗氯离子渗透性,改善顺序按硅灰>矿渣>粉煤灰递减,且随掺量增加,效果更加明显;不同矿物掺合料的组合叠加效果更加优于它们的单掺效果。矿物掺合料主要从两个方面改善了混凝土的抗氯离子渗透性能:一是由于其功能效应,使高性能混凝土内部形成了小孔径、低孔隙率、优化的水泥石—集料过渡区的特殊微观结构,提高了混凝土对Cl<sup>-</sup>离子的扩散阻碍能力;二是由于其对Cl<sup>-</sup>离子的初始固化(物理吸附)作用和二次水化产物的物理化学吸附,使高性能混凝土对Cl<sup>-</sup>离子有较大的固化能力,有利于降低Cl<sup>-</sup>离子在高性能混凝土中的渗透速度,从而提高了高性能混凝土的抗氯离子渗透能力。

理论上,当孔隙液中的传质阴离子仅有氯离子时,电通量与扩散系数之间呈线性关系。实质上, (下转第72页)

腐蚀环境和腐蚀强度采取相应的措施后,PHC管桩是可以满足各种腐蚀环境的设计要求。

参考文献

[1] 吴中伟, 廉慧珍. 高性能混凝土 [M]. 中国铁道出版社, 1999.9.

[2] 冯乃谦, 蔡军旺, 等. 山东沿海钢筋混凝土公路桥的劣化破坏及其对策的研究[J]. 混凝土, 2003.  
 [3] 陈蔚凡. 滨海盐渍地区抗强腐蚀的研究与应用. 水泥基复合材料科学技术, 1999.  
 [4] GB50046-2008, 工业建筑防腐设计规范.  
 [5] GB50021, 岩土工程勘察规范.

(上接第53页) 氯离子的扩散取决于混凝土内部的孔结构, 几乎不受孔隙液化学成分的影响; 而电导率不仅与混凝土的内部孔结构有关, 同时受孔隙液中的离子种类与数量的影响, 即当不同种类混凝土孔溶液中的传质离子发生变化时, 扩散系数与电通量之间并不是一种简单的线性关系。扩散系数随着电通量的增大而增大, 但不一定成线性关系, 这与掺合料的种类有关。当掺合料只有粉煤灰时, 电通量与扩散系数呈曲线关系; 当掺合料为矿粉或硅灰时, 电通量与扩散系数之间呈线性关系。这是由于矿粉和硅灰的颗粒比较细, 掺入混凝土中, 其中一部分颗粒迅速水化, 与水泥的水化产物Ca(OH)<sub>2</sub>反应生成C-S-H胶体, 填充于混凝土内的孔隙中, 另一部分颗粒直接填充于孔隙中, 从而有效地减小混凝土的孔隙率, 改善孔结构。并且矿粉和硅灰颗粒与Ca(OH)<sub>2</sub>反应, 减少了孔隙液中的OH<sup>-</sup>, 提高了孔隙液中的氯离子浓度。所以混凝土中掺入矿粉和硅灰时, 电通量与扩散系数呈线性关系。

通过回归分析法得出电通量与氯离子扩散系数的关系如表5~表9。

表5 单掺粉煤灰扩散系数D与电通量Q的关系

混凝土回归分析类别	关系式	相关系数
28d 扩散系数 D <sub>28</sub> 与 28d 电通量 Q <sub>28</sub>	$D_{28}=5 \times 10^{-7} Q_{28}^2 + 0.0002 Q_{28} + 2.66$	R=1
90d 扩散系数 D <sub>90</sub> 与 90d 电通量 Q <sub>90</sub>	$D_{90}=2 \times 10^{-6} Q_{90}^2 - 0.0042 Q_{90} + 4.72$	R=1

表6 双掺粉煤灰和硅灰时扩散系数D与电通量Q的关系

混凝土回归分析类别	关系式	相关系数
28d 扩散系数 D <sub>28</sub> 与 28d 电通量 Q <sub>28</sub>	$D_{28}=0.002 Q_{28} + 1.43$	R≈1
90d 扩散系数 D <sub>90</sub> 与 90d 电通量 Q <sub>90</sub>	$D_{90}=0.0019 Q_{90} + 1.01$	R=0.995

表7 单掺矿粉扩散系数D与电通量Q的关系

混凝土回归分析类别	关系式	相关系数
28d 扩散系数 D <sub>28</sub> 与 28d 电通量 Q <sub>28</sub>	$D_{28}=0.0022 Q_{28} + 0.98$	R=0.998
90d 扩散系数 D <sub>90</sub> 与 90d 电通量 Q <sub>90</sub>	$D_{90}=0.0024 Q_{90} + 0.26$	R=0.998

表8 双掺矿粉和硅灰时扩散系数D与电通量Q的关系

混凝土回归分析类别	关系式	相关系数
28d 扩散系数 D <sub>28</sub> 与 28d 电通量 Q <sub>28</sub>	$D_{28}=0.0021 Q_{28} + 1.22$	R=0.999
90d 扩散系数 D <sub>90</sub> 与 90d 电通量 Q <sub>90</sub>	$D_{90}=0.0022 Q_{90} + 0.47$	R=0.99

表9 单掺硅灰扩散系数D与电通量Q的关系

混凝土回归分析类别	关系式	相关系数
28d 扩散系数 D <sub>28</sub> 与 28d 电通量 Q <sub>28</sub>	$D_{28}=0.0017 Q_{28} + 1.91$	R=0.999
90d 扩散系数 D <sub>90</sub> 与 90d 电通量 Q <sub>90</sub>	$D_{90}=0.0018 Q_{90} + 1.27$	R=0.993

注: 扩散系数D单位为 $\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ , 电通量Q单位为库仑。

综上所述, 不同矿物掺合料混凝土电通量与氯离子扩散系数之间的拟合相关系数都接近于1, 表明二者拟合效果良好。

3 结束语

(1) 电通量和氯离子扩散系数都可用来评价混凝土的抗氯离子渗透性能, 它们之间存在一定的关系, 电通量随着氯离子扩散系数的增大而增大。对于组分相同的混凝土或掺同种掺合料的混凝土而言, 它们之间的相关性非常好。当掺合料为粉煤灰时, 电通量和氯离子扩散系数之间呈非线性关系; 当掺合料为矿粉或硅灰时, 电通量和氯离子扩散系数之间呈线性关系。

(2) 建立混凝土电通量与氯离子扩散系数之间的相互关系, 就可以用其中一种方法测出的数据知道另外一种方法的数据, 这样就可以避免重复试验, 节约时间和人力, 为广大的混凝土技术人员提供参考。

参考文献

[1] 唐路平. 氯离子在混凝土中的运输——测试、模拟机应用[G]//沿海地区混凝土结构耐久性及其设计方法[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004: 62-69.  
 [2] 陆晗, 刘伟, 邢锋. ASTM C1202 与 RCM 法测定混凝土氯离子渗透性的对比试验 [J]. 混凝土, 2007(4): 6-7, 10.  
 [3] 中国土木工程学会标准. CCES 01-2004, 混凝土结构耐久性设计与施工指南[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.  
 [4] 冯仲伟, 谢永江, 朱长华, 等. 混凝土电通量和氯离子扩散系数的若干问题研究[J]. 混凝土, 2007(10): 7-11.  
 [5] ASTM C1202 - 97, Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration[S].  
 [6] 田俊峰, 潘德强, 赵尚传. 海工高性能混凝土抗氯离子侵蚀耐久寿命预测[J]. 中国港湾建设, 2002(2): 1-6.  
 [7] HU Hongmei, MA Baoguo. The influence of mineral function materials on chloride ion penetration of concrete [J]. J Wuhan Univ Tech Mater Sci, Vol.20, No.1, 2005 (1): 106-110.