

文章编号:1673-2049(2017)06-0085-08

高性能混凝土约束收缩对氯离子扩散的影响

马丽娜, 贡金鑫, 赵艳华

(大连理工大学 建设工程学部, 辽宁 大连 116024)

摘要:对粉煤灰和矿渣粉双掺总量占胶凝材料总质量的百分比分别为30%, 40%和50%及掺合比例分别为1:2, 2:3和1:1的高性能混凝土进行了平板收缩试验和快速氯离子扩散系数测定(RCM法)试验, 分析了高性能混凝土有约束和无约束收缩开裂性能及对氯离子扩散系数的影响规律。研究表明:无约束的混凝土平板均未发生开裂, 有约束的混凝土平板基本开裂, 双掺矿物掺合料显著改善了混凝土的抗裂性能, 当粉煤灰和矿渣粉的掺合比例为1:1时, 其抗裂性能最好, 且随着掺量的增加, 混凝土的抗裂性越好; 矿物掺合料双掺总量和掺合比例一定时, 各配比约束收缩混凝土的等效氯离子扩散系数均高于无约束收缩混凝土的氯离子扩散系数, 即约束收缩增大了混凝土的氯离子扩散系数, 收缩应变越大, 混凝土的抗氯离子性能越差; 当粉煤灰和矿渣粉掺合比例为1:1时, 约束收缩对混凝土内氯离子扩散的影响最小。

关键词:高性能混凝土; 双掺矿物掺合料; 收缩; 开裂; 氯离子扩散系数

中图分类号: TU528

文献标志码: A

Influence of Constrained Shrinkage Cracking on Chloride Ion Diffusivity of High Performance Concrete

MA Li-na, GONG Jin-xin, ZHAO Yan-hua

(Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China)

Abstract: Plate shrinkage test and fast chloride diffusion coefficient test (RCM method) of high performance concrete with total amount of fly ash (FA) and granulated blast furnace slag (GGBFS) of 30%, 40% and 50% by mass of binder and ratio of FA to GGBFS 1:2, 2:3 and 1:1 were carried out. The constrained and unconstrained shrinkage cracking behavior of high performance concrete and its influence on chloride diffusion coefficient were analyzed. The results show that the unconstrained concrete slabs have no cracks, and the constrained concrete slabs all crack. The crack resistance of concrete is significantly improved by mixing FA and GGBFS. The crack resistance is best when the mixing ratio of FA and GGBFS is 1:1. With the increase of FA and GGBFS dosage, the crack resistance of concrete is better. The equivalent chloride ion diffusion coefficient of constrained concrete is higher than that of unconstrained concrete with the same total amount of FA and GGBFS and ratio of FA to GGBFS. The constraint shrinkage crack increases the concrete chloride ion diffusion coefficient. The concrete chloride ion resistance is getting worse with the increase of concrete shrinkage strain. When mixing ratio of FA and GGBFS is 1:1, the influence of constraint shrinkage of concrete on chloride ion diffusion is minimal.

Key words: high performance concrete; double-mixed mineral admixture; shrinkage; cracking;

收稿日期: 2017-06-08

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)项目(2015CB057703)

作者简介: 马丽娜(1990-), 女, 甘肃平凉人, 工学博士研究生, E-mail: malina_dlut@163.com。

diffusion coefficient of chloride ion

0 引言

当混凝土处于无约束的自由状态时,混凝土的收缩不会对结构造成不良影响,但实际工程中混凝土结构由于受到钢筋、基础或者相邻部分的影响而处于不同程度的约束状态,混凝土收缩时因受到约束会产生收缩应力,当混凝土的收缩应力超过其本身的抗拉强度时,将会引起混凝土开裂^[1]。环境中的氯离子等腐蚀介质将通过裂缝侵入混凝土中,对混凝土的使用性能产生不利影响^[2-4]。与普通混凝土相比,高性能混凝土由于掺入大量活性掺合料,具有胶凝材料用量高、水胶比低的特点,其中矿物掺合料不仅减少了混凝土中水泥的用量,改善了混凝土的工作性能,而且使混凝土结构更加密实,降低了混凝土的渗透性,改善了混凝土的耐久性^[5-6]。试验研究表明^[7],在混凝土中掺加 2 种或者 2 种以上的矿物掺合料,其效果明显优于掺入单一矿物掺合料。高性能混凝土在具有诸多优良性能的同时,也存在脆性明显和易于开裂的倾向^[8]。因此,研究双掺矿物掺合料高性能混凝土的早龄期约束收缩及对氯离子扩散性能的影响,对结构的使用性能和耐久性具有重要意义。

目前,国内外对高性能混凝土的早期收缩已经进行了比较多的研究,相对而言,关于混凝土约束收缩开裂后对氯离子扩散性能的影响研究较少^[9]。当

混凝土收缩开裂后,氯离子在混凝土裂缝中的传输与裂缝宽度^[10]、深度^[11-12]和裂缝面的粗糙程度^[13]有关,随着裂缝宽度的增加,混凝土的氯离子扩散系数逐渐增大;粗糙面裂缝混凝土的抗氯离子扩散性能较光滑面裂缝混凝土的好。Kwon 等^[14]采用实际检测的大量数据得到裂缝宽度与氯离子扩散系数之间的关系;Win 等^[15]使用电子探针显微分析方法和显色试验研究了氯离子在开裂混凝土内的传输规律。

本文首先采用有约束和无约束平板收缩试验对双掺粉煤灰和矿渣粉高性能混凝土早期约束收缩特性进行了研究,然后分别在 2 种混凝土平板上钻取试块,对各混凝土试块进行快速氯离子扩散系数测定(RCM)试验,研究了有约束和无约束混凝土收缩对氯离子扩散性能的影响。

1 试验原材料与配合比

试验采用 P. II 52.5R 级硅酸盐水泥,其化学组成(质量分数)如表 1 所示;细集料采用优质河砂,细度模数为 2.4,Ⅱ区级配;粗骨料采用粒径为 5~25 mm、连续级配的优质石灰石质碎石;矿物掺合料分别采用Ⅰ级粉煤灰(F)和 S95 粒化高炉矿渣粉(S),其物理性能指标分别如表 2、3 所示;减水剂采用聚羧酸类高性能减水剂。

单掺粉煤灰和矿渣粉能明显降低混凝土的收缩

表 1 水泥材料化学组成

Tab. 1 Chemical Composition of Cement Materials

%

成分	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	ZnO	MgO	K ₂ O	SO ₃	Na ₂ O	P ₂ O ₅	MnO	Cl ⁻
质量分数	65.60	20.47	3.33	3.09	0.07	1.61	1.07	3.87	0.14	0.05	0.06	0.02

表 2 Ⅰ级粉煤灰性能

Tab. 2 Properties of Class I Fly Ash

细度/%	需水量比/%	烧失量/%	含水量/%	三氧化硫 质量分数/%
10	93	3.5	0.6	2.0

开裂趋势^[16],其中粉煤灰可降低胶凝材料的早期水化反应速度^[17],随着粉煤灰掺量的提高,混凝土早期抗拉强度与弹性模量亦随之降低。矿渣粉的活性

较低,早期基本不参与水化反应,可延缓混凝土的开裂时间^[18],在混凝土中同时掺入粉煤灰和矿渣粉,综合各自优点,可显著改善混凝土的早期收缩开裂性能。试验采用 2 种混凝土配制方法:①胶凝材料总量一定,粉煤灰(F)和矿渣粉(S)双掺总量分别占胶凝材料总量的 30%,40%和 50%;②掺合料总量一定,粉煤灰(F)和矿渣粉(S)的比例分别为 1:2,2:3,1:1,混凝土配合比如表 4 所示。通过调整高

表 3 S95 粒化高炉矿渣粉性能

Tab. 3 Properties of S95 GGBFS

密度/(g·cm ⁻³)	比表面积/(m ² ·kg ⁻¹)	活性指数/%		流动度比/%	含水量/%	三氧化硫 质量分数/%	氯离子 质量分数/%	烧失量/%
		7 d	28 d					
2.87	417	86	101	99	0.1	0.19	0.010	0.05

性能减水剂的用量将混凝土的坍落度控制在 200 mm 左右。

2 试件制作与试验方法

2.1 混凝土早龄期约束收缩试验

试验采用有约束和无约束的板式试件,试件模

具尺寸均为 600 mm×600 mm×63 mm。对于无约束混凝土平板试件,模具四周不做任何处理。对于有约束混凝土平板试件,在模具四周分别布置 2 排 $\phi 10\times 100$ 和 $\phi 10\times 50$ 的螺栓,2 排螺栓相互交错,如图 1 所示。当浇筑的混凝土平板发生收缩时,四周将受到螺栓的约束。每个模具的木底板上铺设 1 层

表 4 混凝土配合比

Tab. 4 Mix Proportions of Concrete

试件编号		水胶比	粉煤灰和矿渣 粉质量分数/%	粉煤灰和矿渣 粉掺合比例	各材料用量/(kg·m ⁻³)					
有约束	无约束				水泥	粉煤灰	矿渣粉	水	砂	碎石
Y0	W0	0.32	0		520	0	0	166	617	1 097
Y30-F1S2	W30-F1S2	0.32	30	1∶2	364	52	104	166	617	1 097
Y30-F2S3	W30-F2S3	0.32	30	2∶3	364	62	94	166	617	1 097
Y30-F1S1	W30-F1S1	0.32	30	1∶1	364	78	78	166	617	1 097
Y40-F1S2	W40-F1S2	0.32	40	1∶2	312	69	139	166	617	1 097
Y40-F2S3	W40-F2S3	0.32	40	2∶3	312	83	125	166	617	1 097
Y40-F1S1	W40-F1S1	0.32	40	1∶1	312	104	104	166	617	1 097
Y50-F1S2	W50-F1S2	0.32	50	1∶2	260	87	173	166	617	1 097
Y50-F2S3	W50-F2S3	0.32	50	2∶3	260	104	156	166	617	1 097
Y50-F1S1	W50-F1S1	0.32	50	1∶1	260	130	130	166	617	1 097

注:Y0,W0 均为未掺矿物掺合料的混凝土,即基准混凝土;Y 代表有约束;W 代表无约束。

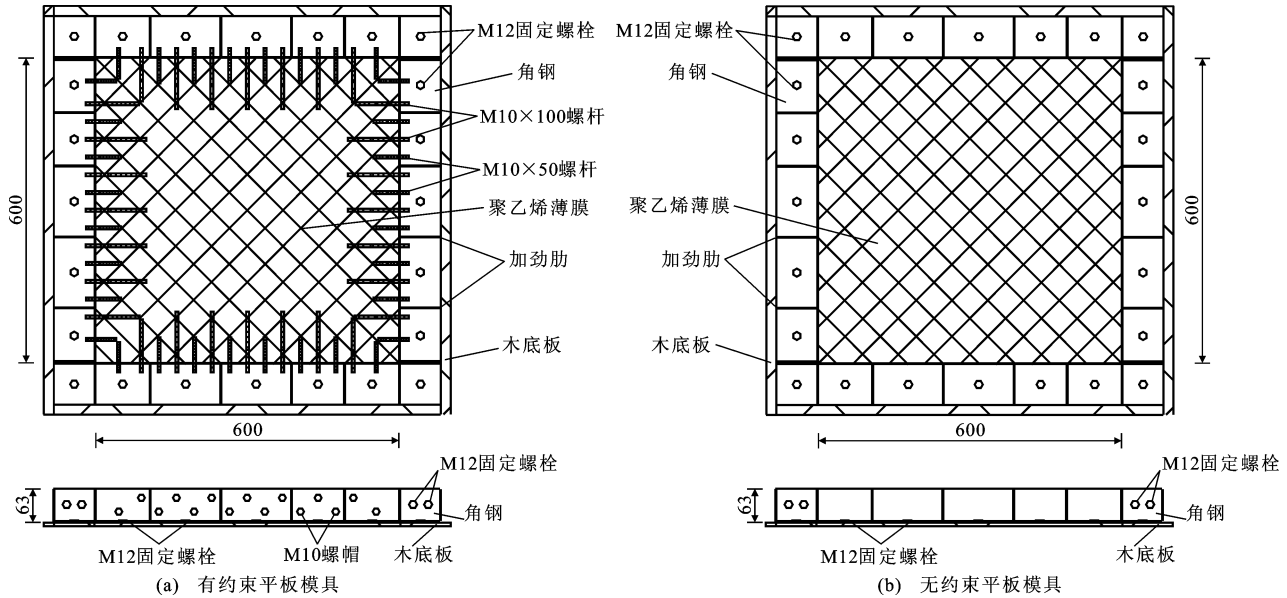


图 1 混凝土平板收缩试验模具(单位:mm)

Fig. 1 Plate Shrinkage Test Mold of Concrete (Unit:mm)

聚氯乙烯薄膜,一方面防止试件底部水泥净浆的流失和水分的散失,另一方面保证底部混凝土收缩无摩擦。浇筑好的试件,放置在室外试验场地,在自然环境条件下进行试验,室外温度约为 25℃,湿度为 60%左右,定时观察每个试件的开裂情况,测量并记录裂缝的宽度和长度。

开裂面积可反映混凝土收缩应力与其抗拉强度

之间的关系,收缩应力大于抗拉强度越多则开裂面积越大,该指标能综合反映混凝土的抗裂性能。根据试验实测数据计算试件单位面积上的总开裂面积,其计算公式为

$$c=\frac{1}{2A}\sum_{i=1}^Nw_{i\max}l_i$$

(1)

式中:c 为单位面积的裂缝总面积; $w_{i\max}$ 为第 i 条裂

缝名义最大宽度; l_i 为第 i 条裂缝长度; N 为试件开裂表面的裂缝总数; A 为混凝土试件的表面积。

2.2 混凝土抗氯离子渗透试验

平板收缩试验 28 d 后,在平板的不同位置钻取混凝土芯样,如图 2 所示。将取出的混凝土芯样制成直径为 100 mm、厚度为 (50 ± 2) mm 的标准试件。先对混凝土标准试件进行饱和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 处理,然后进行抗氯离子渗透试验。试验结束后,将试件放在压力机上进行劈裂,在劈裂面喷涂显色指示剂,约 15 min 后观察劈裂面白色氯化银沉淀情况,如图 3 所示,用游标卡尺测量显色深度并记录数据。同一位置区域至少取 2 个试件,取其平均值进行试验分析。

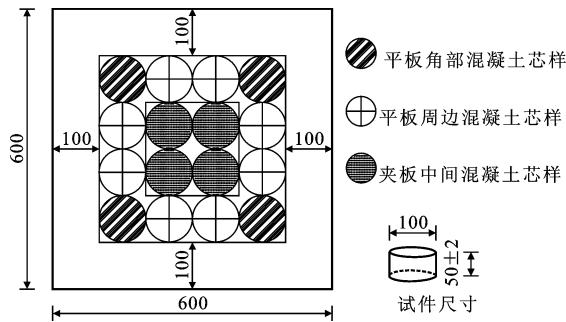


图 2 平板上氯离子扩散试件钻取位置(单位:mm)

Fig. 2 Drilling Positions of Chloride Ion Diffusion Specimens on Slab (Unit:mm)

快速氯离子扩散系数法试验是通过外加电场来加速氯离子在混凝土中的扩散,是一种非稳态试验方法,即扩散系数是时间和位置的函数,一般用 Fick 第二定律描述非稳态扩散,混凝土的非稳态氯离子扩散系数由下式计算

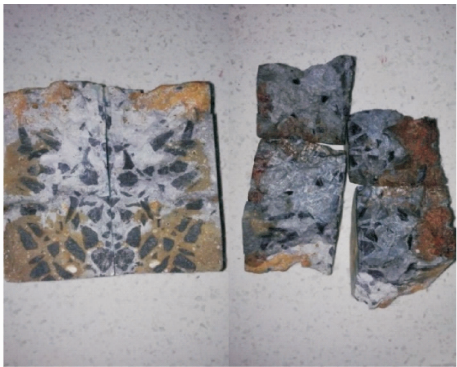
$$D_{RCM} = \frac{RT}{ZEF} \frac{x_d - \alpha \sqrt{x_d}}{t} \tag{2}$$

$$\alpha = 2 \sqrt{\frac{RT}{ZEF}} \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{4c_d}{c_0} \right) \tag{3}$$

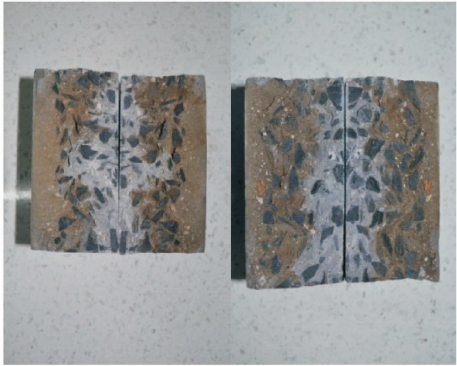
化简计算得

$$D_{RCM} = \frac{0.0239(273+T)L}{(U-2)t} \cdot [x_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273+T)Lx_d}{U-2}}] \tag{4}$$

式中: D_{RCM} 为混凝土的非稳态氯离子扩散系数; R 为气体常量, $R=8.314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$; F 为法拉第常量, $F=0.648 \times 10^4 \text{ J} \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$; Z 为离子化合价的绝对值, $Z=1$; c_0 为阴极电解液中氯离子浓度, $c_0 \approx 2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$; T 为阳极电解液的初始温度和最终温度的平均值; x_d 为氯离子渗透深度的平均



(a) 有裂缝的混凝土芯样



(b) 无裂缝的混凝土芯样

图 3 混凝土芯样劈裂后显色反应结果

Fig. 3 Chromogenic Reaction Results of Concrete Core Sample After Splitting

值; t 为试验持续时间; L 为试件厚度; U 为所用电压的绝对值; $E=(U-2)/L$ 。

3 试验结果与分析

3.1 混凝土早龄期约束收缩性能

表 5 为无约束和有约束混凝土平板试件的收缩开裂试验结果,并给出了与本次试验配合比相同但按国家标准^[19]进行的收缩试验结果^[20]。试验中所有无约束混凝土平板试件均未开裂,而有约束的混凝土平板试件均发生开裂,开裂情况与混凝土中 2 种矿物掺合料的总量和比例有关,而与文献^[20]收缩试验得到试件开裂的混凝土总收缩应变有一定相关性。未掺加矿物掺合料的混凝土平板产生的裂缝较多,单位面积上总开裂面积较大;掺加了矿物掺合料的混凝土平板产生的裂缝较分散,裂缝数目明显减少,单位面积上总开裂面积随着矿物掺合料的增加逐渐减小。矿物掺合料显著改善了混凝土的早龄期收缩开裂性能,随着粉煤灰和矿渣粉掺量的增加,双掺矿物掺合料的混凝土总收缩和干燥收缩均低于未掺加矿物掺合料的混凝土。由表 5 可知,随着矿物掺合料双掺总量的增加,混凝土的总收缩应变值

表 5 有约束和无约束混凝土平板收缩开裂和文献[20]收缩试验结果

Tab. 5 Constrained and Unconstrained Concrete Slab Shrinkage Cracking and Shrinkage Test Results of Literature [20]

本文平板收缩开裂试验结果				文献[20]标准试件收缩试验结果	
无约束混凝土平板		有约束混凝土平板		28 d 自收缩应变/ 10^{-6}	28 d 总收缩应变/ 10^{-6}
试件编号	试验结果	试件编号	单位面积上总开裂面积/ $(\text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-2})$		
W0	无约束混凝土 平板均未发生 收缩开裂。	Y0	904.695	98.3	265.6
W30-F1S2		Y30-F1S2	736.015	203.8	259.6
W30-F2S3		Y30-F2S3	562.080	194.3	246.0
W30-F1S1		Y30-F1S1	541.335	179.1	233.7
W40-F1S2		Y40-F1S2	494.355	212.7	251.6
W40-F2S3		Y40-F2S3	451.490	198.5	236.9
W40-F1S1		Y40-F1S1	388.210	186.3	222.8
W50-F1S2		Y50-F1S2	478.135	227.9	247.2
W50-F2S3		Y50-F2S3	441.335	211.5	234.7
W50-F1S1		Y50-F1S1	340.915	203.1	211.9

减小,有约束混凝土平板单位面积上总开裂面积随之减小。当粉煤灰和矿渣粉双掺总量为 50%时,混凝土总收缩应变值较基准混凝土降低了 16.8%,单位面积上的总开裂面积降低了 62.3%;矿渣粉和粉煤灰不仅细化了混凝土内部的孔隙结构,降低孔隙间的连通性,阻止毛细孔水分的过多蒸发;同时矿渣粉和粉煤灰活性效应使得混凝土早期单位体积水化产物数量减少^[21],水化过程变慢,降低了水泥的水化热,混凝土早龄期的收缩应变值减小。因此,双掺粉煤灰和矿渣粉改善了混凝土的抗裂性能,当粉煤灰和矿渣粉的掺合比例为 1:1 时,混凝土的抗裂性能最好。

3.2 混凝土约束收缩对氯离子扩散的影响

混凝土非稳态氯离子渗透试验的原理是通过外加电压驱动氯离子向混凝土内部扩散,计算得到快速氯离子扩散系数 D ,适用于无裂缝混凝土内氯离子均匀传输的情况。对于有裂缝的混凝土,氯离子扩散不再均匀,理论上不能再采用快速氯离子扩散系数法描述氯离子在混凝土试件内的传输过程,但目前尚没有同时反映混凝土孔隙和裂缝传输氯离子性能的描述方法和参数。本文研究中采用快速氯离子扩散系数法得到带裂缝混凝土的等效氯离子扩散系数 D_{eq} ,通过对有裂缝和无裂缝混凝土氯离子扩散系数的比较,来评价裂缝对氯离子扩散的影响规律。对制备的各试件进行抗氯离子渗透试验,分别计算有约束开裂混凝土的等效氯离子扩散系数 D_{eq} 和无约束未开裂混凝土的氯离子扩散系数 D 。

3.2.1 约束收缩开裂的影响

表 6 为在粉煤灰和矿渣粉双掺总量和掺加比例一定的情况下,有约束混凝土平板试件等效氯离子

扩散系数的变化。由表 6 可知,约束收缩混凝土试件的等效氯离子扩散系数均高于相同配比的无约束收缩混凝土试件。无约束收缩混凝土试件内氯离子传输取决于混凝土内部的孔隙结构,即混凝土的氯离子扩散系数主要受混凝土中有效总孔隙率和孔径分布的影响,孔隙率越大,氯离子扩散系数越大。约束收缩混凝土试件内氯离子传输不仅与混凝土的孔隙结构有关,而且与混凝土内的裂缝分布有关,裂缝增加了混凝土内的氯离子扩散通道,加速了氯离子的扩散,因此约束收缩混凝土的等效氯离子扩散系数均高于无约束自由收缩混凝土的氯离子扩散系数。约束收缩混凝土试件氯离子扩散系数随取样位置不同差别较大,具体表现为角部试件的氯离子扩散系数高于边部试件的氯离子扩散系数和中部试件的氯离子扩散系数,这主要与混凝土受约束的程度以及所产生的裂缝有关,角部混凝土芯样同时受两侧约束较大,产生的裂缝较多,氯离子通过裂缝向混凝土内部传输,同时在裂缝壁面处向混凝土内部横向扩散,裂缝加速了氯离子向混凝土内的扩散速率。

3.2.2 矿物掺合料的影响

表 6 中未掺加矿物掺合料的混凝土试件等效氯离子扩散系数均高于掺加了矿物掺合料的混凝土试件等效氯离子扩散系数,随着粉煤灰和矿渣粉掺量的增加,混凝土的氯离子扩散系数逐渐减小。粉煤灰和矿渣粉掺入混凝土中,一方面改善了混凝土的孔隙结构,使得混凝土内部孔隙细化,孔隙率下降,混凝土的密实度提高;另一方面改善了混凝土的水化产物,粉煤灰和矿渣粉的火山灰效应减少了混凝土内部稳定性较差的粗大氢氧化钙晶体,同时生成的 C-S-H 凝胶体能够结合混凝土中的氯离子^[22],从

表 6 无约束收缩和约束收缩混凝土试件氯离子扩散系数

Tab. 6 Chlorine Diffusion Coefficients of Unconstrained and Constrained Concrete Shrinkage Specimens

粉煤灰和矿渣粉 质量分数/%	粉煤灰和矿渣粉 掺合比例	氯离子扩散系数/(10 ⁻¹² m ² · s ⁻¹)					
		无约束收缩混凝土试件			约束收缩混凝土试件		
		角部	边部	中间	角部	边部	中间
0		7.95	7.92	7.66	9.46	9.31	8.36
30	1 : 2	4.59	4.37	4.49	8.92	8.24	6.69
	2 : 3	5.28	5.17	5.05	6.68	5.94	5.62
	1 : 1	6.07	5.82	5.77	7.51	6.58	6.39
40	1 : 2	3.76	3.74	3.58	7.69	6.74	5.55
	2 : 3	4.80	4.53	4.43	6.30	5.63	4.98
	1 : 1	5.57	5.22	5.08	6.77	6.01	5.43
50	1 : 2	3.48	3.33	3.39	6.59	6.23	5.98
	2 : 3	4.25	4.01	3.98	5.85	5.41	4.77
	1 : 1	6.02	6.03	5.76	6.33	6.18	5.88

而提高了混凝土的抗氯离子扩散能力。

对于无约束收缩混凝土试件,当粉煤灰和矿渣粉的双掺总量一定,掺合比例为 1 : 2 时混凝土的氯离子扩散系数最小,这是由于矿渣粉的火山灰活性和水化程度均大于粉煤灰^[21]。矿渣粉先反应生成的 C-S-H 凝胶体结合混凝土中的氯离子,而粉煤灰的作用主要体现在物理吸附效应上。随着混凝土逐渐硬化,粉煤灰的火山灰效应得以发展,降低了混凝土中氯离子扩散的速率,因此随着矿渣粉掺量的增加,混凝土的氯离子扩散系数减小。

对于约束收缩混凝土试件,未掺加矿物掺合料的混凝土收缩开裂最严重,裂缝加速了混凝土内氯离子的扩散。当粉煤灰和矿渣粉掺加总量不变时,由表 5 还可知,随着粉煤灰比例的增大,混凝土的总收缩应变降低,收缩应力减小,混凝土内的收缩裂缝减少,粉煤灰和矿渣粉的掺合比例为 1 : 1 时,混凝土的抗裂性最好。氯离子通过裂缝向混凝土内扩散的路径减少,裂缝改变了混凝土的抗氯离子渗透能力。与无约束未开裂混凝土相比,约束开裂混凝土掺合比例为 2 : 3 时等效氯离子扩散系数较小,说明约束收缩开裂改变了混凝土的抗氯离子渗透能力。

3.2.3 约束收缩影响系数

为了研究混凝土约束收缩对氯离子扩散的影响,本文引入约束收缩影响系数

$$\beta=\frac{|D_{cr}-D_0|}{D_0}$$

(5)

式中: β 为混凝土约束收缩影响系数; D_{cr} 为有约束收缩混凝土试件等效氯离子扩散系数; D_0 为无约束收缩混凝土试件氯离子扩散系数。

对于有约束收缩开裂的混凝土,氯离子不仅从

暴露面侵入混凝土内部,而且可以从裂缝壁面侵入混凝土内部,无约束收缩的混凝土,氯离子仅从暴露面侵入混凝土内部,因此式(5)实际上表示约束收缩对氯离子在混凝土内扩散的贡献率, β 越大,表示约束收缩的影响越大。不同配合比混凝土不同位置的约束收缩影响系数如图 4 所示。由图 4 可知,角部试件的约束收缩影响系数最大,这主要与混凝土受约束的程度及产生的裂缝有关,角部试件同时受两侧约束,裂缝多集中分布在角部,少数出现在边部顺螺栓方向。

由图 4 可知,粉煤灰和矿渣粉掺合比例为 1 : 1 时,混凝土约束收缩影响系数最小,此时约束收缩对混凝土氯离子扩散的影响最小,这与表 5 中的试验结果一致,粉煤灰和矿渣粉掺合比例为 1 : 1 时,混凝土的抗裂性能最好,混凝土平板上收缩裂缝相对较少,约束收缩裂缝对混凝土的氯离子扩散影响较低。

4 结 语

(1)本文进行了高性能混凝土平板收缩开裂试验和快速氯离子扩散试验,通过对比无约束收缩未开裂混凝土平板和有约束收缩开裂混凝土平板的开裂情况,引入混凝土约束收缩影响系数 β ,分析了约束收缩对混凝土内氯离子扩散规律的影响。

(2)无约束的混凝土平板均未发生开裂,有约束的混凝土平板基本开裂,双掺矿物掺合料显著改善了混凝土的抗裂性能,当粉煤灰和矿渣粉的掺合比例为 1 : 1 时,其抗裂性能最好,且随着掺量的增加,混凝土的抗裂性越好。

(3)矿物掺合料双掺总量和掺合比例一定时,各

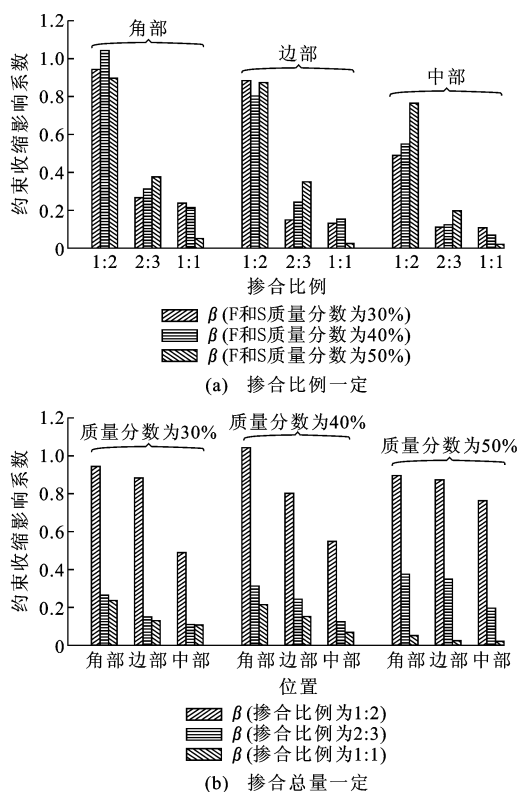


图4 不同矿物掺合料掺合总量和掺合比例的约束收缩影响系数

Fig. 4 Constraint Shrinkage Influence Coefficients of Different Mineral Admixtures and Proportions of Admixtures

配比约束收缩混凝土的等效氯离子扩散系数均高于无约束收缩混凝土的氯离子扩散系数,即约束收缩增大了混凝土氯离子扩散系数,收缩应变越大,混凝土的抗氯离子性能越差。

(4)有约束的混凝土中,当粉煤灰和矿渣粉掺合比例为1:1时,混凝土的氯离子扩散系数最小,即此时约束收缩对混凝土氯离子扩散的影响最小。

参考文献:

References:

- [1] 黄国兴,惠荣炎.混凝土的收缩[M].北京:中国铁道出版社,1990.
HUANG Guo-xing, HUI Rong-yan. Shrinking of Concrete [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1990.
- [2] 张邵峰,陆春华,陈好,等.裂缝对混凝土内氯离子扩散和钢筋锈蚀的影响[J].工程力学,2012,29(增1):97-100.
ZHANG Shao-feng, LU Chun-hua, CHEN Yu, et al. Influence of Cracks on Chloride Diffusion and Reinforcement Corrosion in Concrete[J]. Engineering Me-

chanics, 2012, 29(S1): 97-100.

- [3] 朱红光,易成,孙辅延,等.混凝土收缩裂缝几何特征及其对氯离子渗透的影响[J].哈尔滨工业大学学报,2016,48(12):142-147.
ZHU Hong-guang, YI Cheng, SUN Fu-yan, et al. Geometrical Characteristic of Concrete Shrinkage Crack and Its Effect on Chloride Ion Permeability[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(12): 142-147.
- [4] 杨建森,王培铭.盐碱溶液对混凝土氯离子渗透性能的影响[J].哈尔滨工业大学学报,2008,40(12):2048-2053.
YANG Jian-sen, WANG Pei-ming. Influence of Saline-alkaline Solution on Chloride Permeability of Concrete[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 40(12): 2048-2053.
- [5] 王钧,栾奕,叶焕军.玄武岩纤维混凝土梁裂缝和变形试验研究[J].建筑科学与工程学报,2016,33(4):76-81.
WANG Jun, LUAN Yi, YE Huan-jun. Experimental Research on Crack and Deformation of Basalt Fiber Reinforced Concrete Beams[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2016, 33(4): 76-81.
- [6] POURSAEE A, HANSSON C M. The Influence of Longitudinal Cracks on the Corrosion Protection Afforded Reinforcing Steel in High Performance Concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2008, 38(8/9):1098-1105.
- [7] 赵铁军.混凝土渗透性[M].北京:科学出版社,2006.
ZHAO Tie-jun. Concrete Permeability [M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [8] DJERBI A, BONNET S, KHELIDJ A, et al. Influence of Traversing Crack on Chloride Diffusion into Concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2008, 38(6):877-883.
- [9] 张士萍,刘加平,董良峰.收缩裂缝对混凝土氯离子传输的影响[J].武汉理工大学学报,2011,33(6):90-92,143.
ZHANG Shi-ping, LIU Jia-ping, DONG Liang-feng. Influence of Shrinkage Cracking on Chloride Ions Transport of Concrete[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2011, 33(6): 90-92, 143.
- [10] ALDEA C M, SHAH S P, KARR A. Effect of Cracking on Water and Chloride Permeability of Concrete [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1999, 11(3):181-187.
- [11] WHITING D. Rapid Measurement of the Chloride Permeability of Concrete[J]. Public Roads, 1981, 45

- (3):101-112.
- [12] RODRIGUEZ O G, HOOTON D. Influence of Cracks on Chloride Ingress into Concrete[J]. ACI Materials Journal, 2003, 100(2):120-126.
- [13] NT Build 443, Concrete, Hardened; Accelerated Chloride Penetration[S].
- [14] KWON S J, NA U J, PARK S S, et al. Service Life Prediction of Concrete Wharves with Early-aged Crack; Probabilistic Approach for Chloride Diffusion [J]. Structural Safety, 2009, 31(1):75-83.
- [15] WIN P P, WATANABE M, MACHIDA A. Penetration Profile of Chloride Ion in Cracked Reinforced Concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(7):1073-1079.
- [16] DIAS W P S. Influence of Mix and Environment on Plastic Shrinkage Cracking[J]. Magazine of Concrete Research, 2003, 55(4):385-394.
- [17] 张 君, 阎培渝, 覃维祖. 建筑材料[M]. 北京:清华大学出版社, 2008.
ZHANG Jun, YAN Pei-yu, QIN Wei-zu. Building Materials[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.
- [18] 郑建岚, 罗素蓉, 王雪芳. 高性能混凝土抗裂性能研究[J]. 工程力学, 2008, 25(增 2):71-98.
ZHENG Jian-lan, LUO Su-rong, WANG Xue-fang. The Research on the Cracking Behavior of High Performance Concrete[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(S2):71-98.
- [19] GB/T 50082—2009, 普通混凝土长期性能和耐久性试验方法标准[S].
GB/T 50082—2009, Standard for Test Methods of Long-term Performance and Durability of Ordinary Concrete[S].
- [20] 赵素梅, 贡金鑫. 双掺矿物掺合料高性能混凝土的强度与收缩试验研究[J]. 混凝土, 2016(2):81-86, 89.
ZHAO Su-mei, GONG Jin-xin. Study on Strength and Shrinkage of High Performance Concrete with Compound Mineral Admixtures[J]. Concrete, 2016(2):81-86, 89.
- [21] 姚 燕. 高性能混凝土的体积变形及裂缝控制[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2011.
YAO Yan. Volume Stability and Crack Control of High Performance Concrete[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [22] 刘志勇, 孙 伟. 基于饱海水电阻率的海工混凝土氯离子扩散系数测试方法试验研究[J]. 混凝土, 2006(3):25-28.
LIU Zhi-yong, SUN Wei. Rapid Testing Method for Chloride Ion Diffusion Coefficient of Marine Concrete Saturated with Seawater Based on Electrical Resistivity Measurement (II): Experimental Research [J]. Concrete, 2006(3):25-28.