

矿物掺合料对蒸养混凝土传输性能和孔结构的影响

魏玲玲, 贺智敏, 李一鸣, 王建民
(宁波大学土木与环境工程学院, 浙江宁波 315211)

摘要: 为提高混凝土预制构件耐久性, 试验研究了单掺及复掺矿物掺合料对蒸养混凝土毛细吸水性和抗氯离子渗透的影响, 结合可蒸发水含量法测孔结构探讨了作用机理。结果表明: 矿物掺合料在低水胶比下能更为有效地改善蒸养混凝土的传输性能; 在脱模和 28d 龄期时, 矿物掺合料对蒸养混凝土传输性能的改善效果从高到低依次为硅灰、偏高岭土、矿渣、粉煤灰; 90d 龄期时, 偏高岭土与硅灰相当, 且均优于矿渣和粉煤灰; 混凝土孔结构与传输性能关系密切, 孔隙率降低和孔径细化是蒸养混凝土传输性能得以改善的主要原因。

关键词: 蒸养混凝土; 矿物掺合料; 毛细吸水性; 抗氯离子渗透; 孔结构

中图分类号: TU528 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2020)01-0179-08

Influence of mineral admixtures on transportation properties and pore structure of steam-cured concrete

WEI Lingling, HE Zhimin, LI Yiming, WANG Jianmin

(School of Civil and Environmental Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: For improving the durability of prefabricated components made of steam-cured concrete, the effect of individual and compound mineral admixture on the capillary absorption coefficient and resistance of chloride ion penetration were analyzed, and its mechanism was studied with concrete porosity tested by the evaporable water content method. Results indicated that the transportation properties of steam-cured concrete was greatly improved by mineral admixture at low water - binder ratio. The improvement effect of mineral admixture on the transportation properties of steam-cured concrete from the greatest to the least is silica fume (SF), metakaolin (MK), ground slag (GS) and fly ash (FA) at the stage of demould and 28-day. The effect of MK was equivalent to that of SF at 90-day stage, and these two mineral admixtures were superior to GS and FA. The concrete pore structure had close relationship with transportation performance. The decrease of porosity and the refinement of pore size contributed mostly to the improvement of the transportation properties of steam-cured concrete.

Key words: steam-cured concrete; mineral admixture; capillary water sorptivity; resistance of chloride ion penetration; pore structure

1 研究背景

蒸汽养护技术是目前建筑工程中混凝土预制构件工业化生产的重要手段。蒸养混凝土具有早期强度发展快、模板周转快和生产效率高等优点, 但可能降低水泥混凝土的最终水化程度和强度, 粗化孔结构, 影响混凝土的传输性能^[1]。混凝土的传输性能

与耐久性直接相关, 主要包括混凝土毛细吸水性、抗氯离子渗透或气体渗透等性能^[2]。

一些学者通过掺矿物掺合料改善混凝土的传输性能。Ho 等^[3]研究了掺粉煤灰、矿渣和硅灰蒸养混凝土的毛细吸水性, 发现仅硅灰和矿渣可降低毛细吸水性。Hooton 等^[4]和 Gesoğlu^[5]发现掺硅灰、偏高岭土和矿渣有利于改善蒸养混凝土的抗氯离子渗透

收稿日期: 2019-07-10; 修回日期: 2019-09-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878360); 浙江省自然科学基金项目(LY17E080007、LY18E080008)

作者简介: 魏玲玲(1995-), 女, 湖北荆州人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 混凝土材料。

通讯作者: 贺智敏(1973-), 男, 湖南邵阳人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向: 混凝土结构耐久性。

性。董必钦等^[6]用电化学阻抗谱分析得到矿渣粉能降低混凝土中氯离子的渗透深度。邵俊丰等^[7]认为复掺矿物掺合料可更有效地降低混凝土氯离子渗透性。胡瑾等^[8]研究了高、低水胶比的情况下,钢渣-硅灰复合矿物掺合料对混凝土渗透性的影响,发现低水胶比下复合掺加钢渣与硅灰优于单掺矿渣。由于不同文献试验采用的胶凝材料组成、养护、试验条件等的差异,导致矿物掺合料的活性发挥不同,得到的结论不尽相同。

从不少研究^[9-10]亦可知,对比常温养护,蒸养条件对掺矿物掺合料混凝土微结构与性能将产生不同的影响,但相关研究仍较缺乏且不够系统,蒸养混凝土微观结构、性能、组成及蒸养工艺之间的相互关系原理尚未厘清,导致蒸养混凝土预制构件的质量缺陷时常发生。

为提高蒸养混凝土预制构件耐久性能,本文结合高铁预制构件的蒸养制度,采用新近开发的偏高岭土^[11-12],开展单掺和复掺矿物掺合料蒸养混凝土传输性能试验,调查胶凝材料组成及水胶比对蒸养混凝土毛细吸水性和抗氯离子渗透的影响,并定量分析孔结构和传输性能之间的关系。

2 实验材料与方法

2.1 原材料与配合比

水泥:42.5级普通硅酸盐水泥,密度3.13 g/cm³;偏高岭土(MK):淡粉色粉末,平均粒径为2 μm,比表面积约为25 000 m²/kg;粉煤灰(FA)和硅灰(SF)均为灰色粉末状,FA比表面积为420 m²/kg,SF比表面积为23 000 m²/kg;矿渣(GS)为黑灰色细粒状,各胶凝材料化学组成见表1。

表1 胶凝材料的化学组成

材料	质量百分比/%						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	烧失量
普通水泥	24.5	4.5	3.50	55.2	4.0	2.0	2.2
偏高岭土	64.8	29.1	1.00	0.3	1.6	0.2	
粉煤灰	40.9	22.5	3.50	1.3	1.5	0.8	
矿渣	38.8	12.9	1.46	38.7	4.6		
硅灰	86.5	2.2	3.20	0.8	1.1		

粗骨料:5~15 mm连续级配石灰石碎石;细骨料:福建闽江生产的中砂,细度模数为2.62,过5 mm的筛;减水剂:聚羧酸高效减水剂,减水率≥20%;拌合水:自来水。本试验制备试件的配合比见

表2,试验过程中为保证各配合比混凝土的坍落度相同,适当调整了减水剂的掺量。

2.2 试验方法

2.2.1 试件成型与处理 混凝土试件按表2中的配合比进行配料,先采用卧轴强制式搅拌机进行拌合,搅拌时间为180秒,再利用振动台使试件密实成型。胶凝材料的水化程度和混凝土的性能发展均会受到蒸养制度各参数的影响,且影响情况比较复杂,为便于比较,本试验采用统一的养护制度,即试块成型后先在20℃的养护箱中静停3 h,然后在2 h内升温至60℃,并保持该温度10 h,最后降温1 h。

2.2.2 测试方法 毛细吸附作用是外界液态介质侵入非饱和混凝土的最主要方式之一,故毛细吸水性常用来评价混凝土建筑材料的使用寿命,毛细水吸附系数越小,表明毛细吸水性越小,对提高混凝土耐久性越有利^[13]。

采用ISAT(initial surface absorption test)方法测定混凝土的毛细吸水性^[14],成型100 mm立方体试件,养护至所需龄期后,在105℃的烘箱中预处理4 h,以保证试块的初始含水率相同。冷却后用石蜡密封4个侧面,然后将试块置于水中架空,从而使其底面充分暴露在水中,且通过补充加水始终保持水位不高于底面5 mm,按一定时间称量试块重量(称量时擦去试块表面的水,且在30 s内完成),测得数据后用公式(1)和(2)计算试块的毛细水吸附系数*S*(mm/min^{0.5})。

$$i = A + S \cdot t^{1/2} \quad (1)$$

$$i = \Delta W / (A_r \cdot \rho_0) \quad (2)$$

式中:*i*为试块的吸水高度,mm;*t*为测量时间,分别为0、1/6、1/3、2/3、1、4/3、2、8/3、10/3、4、6、13、24 h; ΔW 为吸水质量,g; A_r 为试件与水接触面积,mm²; ρ_0 为水的密度,g/mm³;A为常数。由 ΔW 计算不同时间的*i*,并绘制*i*-*t*^{0.5}曲线,最终利用数学软件进行线性拟合得到该曲线的斜率,即为毛细水吸附系数。

混凝土抗氯离子渗透性采用《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T50082-2009)中的快速氯离子迁移系数法(RCM法)进行检测和评价。成型底面Φ100 mm高50 mm圆柱体试件后立即用塑料薄膜覆盖并移至标准养护室。次日拆模后于标准养护室浸水养护,试验前一天从养护室中取出试块并采用砂纸和细锉刀打磨光滑,然后放入含有饱和Ca(OH)₂溶液的真空饱水机中饱水1 d,随后将饱和结束的试块放入白色橡胶筒内,并置于试验槽中,其中橡胶筒内的阳极溶液为0.3

mol/L NaOH 溶液,试验槽中的阴极溶液为 10% NaCl 溶液。

具体试验装置见图 1(a),在通电过程中,橡胶筒内外液面高度应保持齐平。结束通电后,将取出的试块如图 1(b)所示从中间劈开,并立即向断面喷涂 0.1mol/L AgNO₃ 溶液显色,显色分界线已在图 1(c)中用红线标出,根据如图 1(d)所示的测点测量红线至试块底面的距离。氯离子渗透平均深度即为测距的平均值,最后利用标准中的公式计算氯离子扩散系数。评价标准见表 3。

表 2 试件配合比

编号	水泥	偏高岭土	粉煤灰	矿渣	硅灰	水胶比	砂	石	减水剂/%
P0	1.00					0.35	1.37	2.54	1.0
P5	0.95	0.05				0.35	1.37	2.54	1.0
P10	0.90	0.10				0.35	1.37	2.54	1.0
P15	0.85	0.15				0.35	1.37	2.54	1.0
P20	0.80	0.20				0.35	1.37	2.54	1.0
W1	0.85	0.15				0.30	1.41	2.63	1.5
W2	0.85	0.15				0.35	1.37	2.54	1.0
W3	0.85	0.15				0.40	1.33	2.47	
W4	0.85	0.15				0.45	1.28	2.38	
C1	1.00					0.30	1.26	2.34	1.5
C2	0.70		0.15	0.15		0.30	1.24	2.29	1.5
C3	0.70		0.10	0.20		0.30	1.24	2.29	1.5
C4	0.70	0.05	0.25			0.30	1.24	2.29	1.5
C5	0.70	0.10	0.20			0.30	1.24	2.29	1.5
C6	0.70	0.15	0.15			0.30	1.24	2.29	1.8
C7	0.70	0.20	0.10			0.30	1.24	2.29	1.8
C8	0.70		0.25		0.05	0.30	1.24	2.29	1.5

注:减水剂掺量为胶凝材料的质量百分比。

表 3 RCM 方法评价混凝土渗透性参考标准
(GB/T50082-2009)

氯离子扩散系数/ $10^{-12}(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	抗氯离子渗透性
<2	非常好
2~8	较好
8~16	一般
>16	不适用严酷环境

孔结构测试参照可蒸发水含量法进行,成型 150 mm 立方体试件,经过养护、取芯和切割得到 $\Phi 100 \times 50$ mm 混凝土试件。试件真空饱水后,称取

试件的饱水质量(M_0),采用饱和氯化钡溶液保持干燥器约 90% 的相对湿度环境,然后将试件置于干燥器中。称取试块水分扩散达到平衡状态时的质量(M_1)。最后将试块放在烘箱中,将烘箱温度调至 105℃ 烘干至恒重,称取试块冷却后的质量(M_2)。由 M_0 、 M_1 、和 M_2 计算得到大孔隙率(孔径大于 30 nm)和总孔隙率。

3 结果分析与讨论

3.1 水胶比对蒸养混凝土传输性能的影响

采用表 2 中的 W1~W4 配合比,研究了偏高岭土掺量 15% 时不同水胶比蒸养混凝土毛细吸水性的变化,试验结果如图 2 所示。

由图 2 可见,混凝土试件的 $i-t^{0.5}$ 曲线可分为两个阶段,根据不同阶段的曲线斜率可知,试块的吸水速率会随着时间的增长而降低,这是因为毛细孔吸附作用控制了试块的早期吸水性,而后期吸水速率在很大程度上会受到大孔扩散的影响。比较 3 个龄期的 $i-t^{0.5}$ 曲线图可知,混凝土的毛细吸水性随水胶比的增大而增大,且在脱模龄期时,由于水胶比增大,毛细吸水性的增长幅度高于 28 和 90 d 龄期,当水胶比由 0.30 分别增长至 0.35、0.40、0.45 时,试块的早期毛细水吸附系数依次上升了 38.9%、66.7%、117.7%。

采用表 2 中的 W1~W4 配合比,研究了偏高岭土掺量 15% 时,不同水胶比蒸养混凝土氯离子扩散系数的变化,同时与标养混凝土进行了对比,试验结果如图 3 和 4 所示,虚线以下为达到抗氯离子渗透性非常好的水平(下同)。

由图 3 可见,随着水胶比的增大,氯离子扩散系数也呈增大趋势。以 28 d 龄期为例,当水胶比由 0.30 分别增长至 0.35、0.40、0.45 时,试块的氯离子扩散系数依次上升了 23.1%、76.9%、146.2%。其原因是当水胶比较大时,胶凝材料的包裹水膜层将变厚,但水泥水化理论水胶比为 23% 左右,多余的水会在试块中形成毛细孔,导致孔隙数量增多,故水胶比大的试块吸水性和氯离子扩散系数较大。对比图 3 和 4 可看出,脱模龄期时,高水胶比蒸养试件的氯离子扩散系数明显高于对应的标养试件,而随着水胶比降低,蒸养试件与对应标养试件的扩散系数差距变小,说明高水胶比混凝土经蒸养后的抗氯离子渗透性不佳。无论蒸养还是标养试件,后续养护龄期越长,氯离子扩散系数越小。

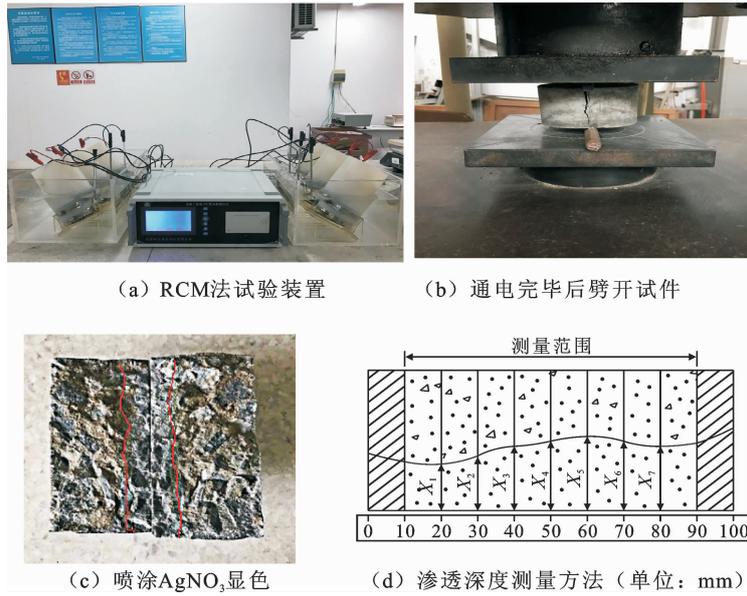


图1 氯离子渗透试验装置、过程及方法

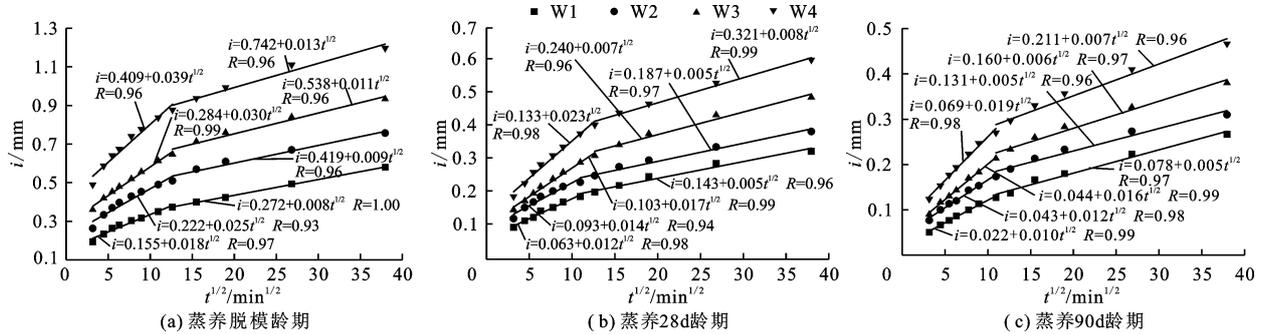


图2 不同水胶比蒸养混凝土毛细吸水性

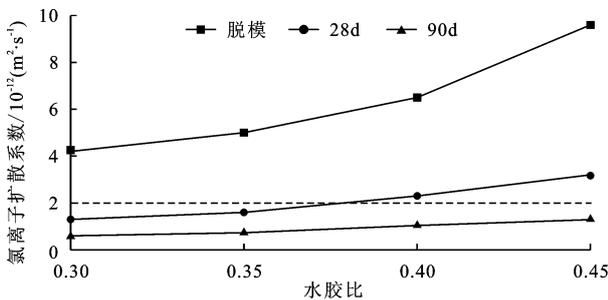


图3 蒸养试件不同龄期氯离子扩散系数

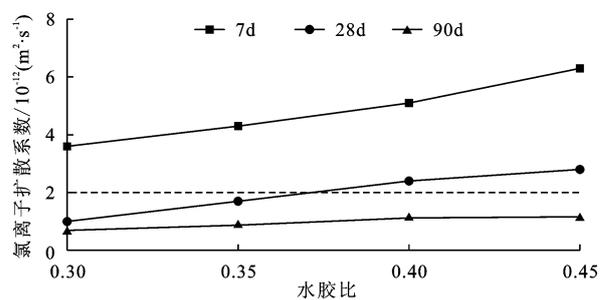


图4 标养试件不同龄期氯离子扩散系数

3.2 单掺偏高岭土对蒸养混凝土传输性能的影响

固定水胶比 0.35, 研究了偏高岭土掺量变化 0~20% 时蒸养混凝土的毛细吸水性, 结果如图 5 所示。由图 5 可见, 蒸养混凝土在 3 个龄期的毛细水吸附系数均随偏高岭土掺量增大而降低, 且在 28 d 前的降低速率明显高于 90 d 龄期。在 28 d 龄期, 与不掺偏高岭土的试块相比, 当掺量为 5%、10%、15%、20% 时, 混凝土的毛细水吸附系数分别降低 19.2%、27.1%、24.1%、43.7%。当偏高岭土掺量

相同时, 随着龄期增长, 各配合比蒸养混凝土毛细吸水性逐渐降低, 且养护前期的影响较大。掺 5% 偏高岭土的试块在 28 和 90 d 时, 与脱模龄期相比, 毛细水吸附系数分别降低了 43.7% 和 46.1%。由此可知, 随养护龄期的增长, 混凝土毛细水吸附系数逐渐稳定。

图 6 对比了蒸养和标养混凝土毛细吸水性的差异。当偏高岭土掺量小于 15% 时, 同配合比蒸养混凝土毛细吸水性高于标养混凝土。在蒸养混凝土中

掺入 15% 和 20% 的偏高岭土时, 28 和 90 d 龄期的毛细吸水性均低于同条件下的标养试块。这表明,

掺适量的偏高岭土对混凝土由于蒸养造成的热伤损有一定的改善效果^[14]。

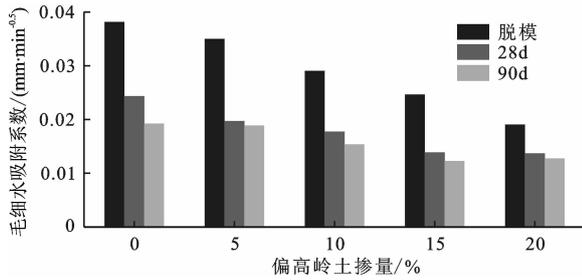


图 5 不同偏高岭土掺量蒸养混凝土毛细吸水性

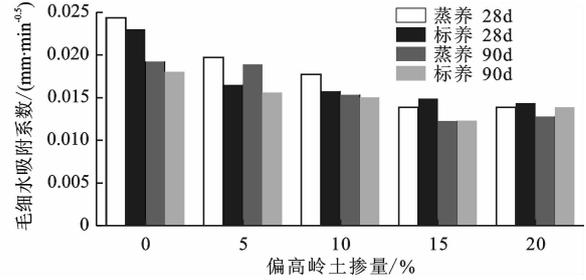


图 6 蒸养标养不同龄期混凝土毛细吸水性对比

仅改变偏高岭土含量, 测试混凝土 P0 ~ P20 试块在不同龄期下的氯离子扩散系数, 结果如图 7 所示。由图 7 可知, 固定 0.35 水胶比, 随偏高岭土掺量增加, 各个龄期的氯离子扩散系数均是先降低而后趋于稳定。故掺入偏高岭土有助于提高蒸养混凝土的抗氯离子渗透性, 考虑到流动性损失, 最佳偏高岭土掺量宜为 15%。结合表 3 可知, 随着龄期的增长, 掺偏高岭土的各组均达到了抗氯离子渗透性非常好的水平, 适用于严酷环境中的建筑物。

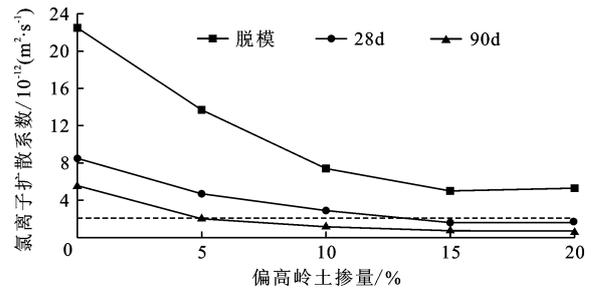


图 7 不同偏高岭土掺量蒸养试件氯离子扩散系数

图 8 是通电测试完毕后劈开试件的照片, 喷洒硝酸银显色后, 氯离子渗透的区域呈现灰白色, 未出现氯离子的区域呈现金黄色, 边界已用红线描出。

由图 8 可见, 90 d 龄期, 无论何种养护, 空白组试件的渗透深度均为最大, 且蒸养试件渗透深度大于标养试件, 而掺偏高岭土可较大幅度降低氯离子渗透深度。

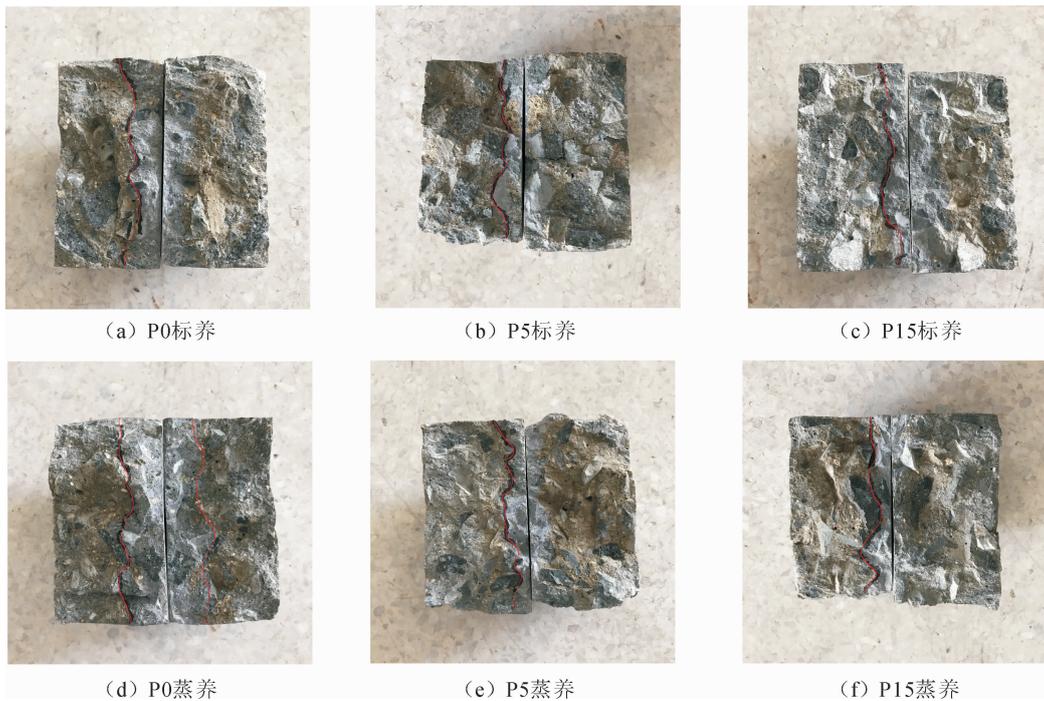


图 8 不同配合比混凝土标养和蒸养 90d 龄期氯离子渗透深度对比

3.3 矿物掺合料对蒸养混凝土传输性能的影响

蒸养试块 C1 ~ C8 在 3 个龄期的毛细吸水性如图 9 所示。与 C1 相比, C2 ~ C8 的矿物掺合料总取

剂量均为 30%, 由此可知, 混凝土的毛细吸水性与其胶凝材料组成关系密切, 矿物掺合料组成不同导致毛细水吸附速率存在较大的差异。脱模龄期时的

C4 试块毛细水吸附系数最大,且 C4 混凝土中掺入了较多的粉煤灰,这表明粉煤灰在很大程度上会增大蒸养混凝土的早期毛细水吸附系数,对蒸养混凝土耐久性是不利的。对比几组粉煤灰掺量相同试块的毛细吸水性,由 C2 和 C6 组、C3 和 C7 组可知,偏高岭土比矿渣有利;由 C4 和 C8 组可知,硅灰比偏高岭土更有利。

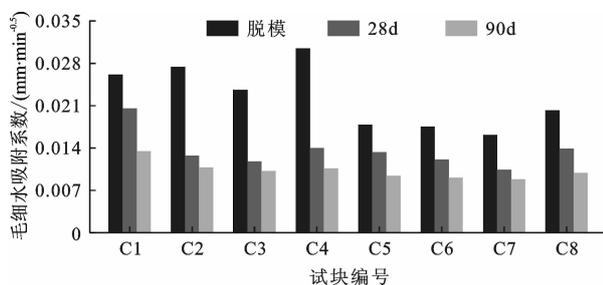


图9 蒸养混凝土毛细吸水性

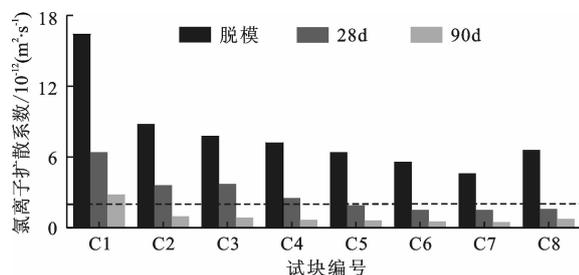


图10 蒸养混凝土氯离子扩散系数

蒸养试块 C1 ~ C8 在 3 个龄期的氯离子扩散系数如图 10 所示。由图 10 可知,空白组 C1 的氯离子扩散系数在 3 个龄期均为最大,这说明矿物掺合料有利于提高蒸养混凝土的抗氯离子渗透性。在同粉煤灰掺量条件下,无论哪个龄期,掺偏高岭土的 C6 与 C7 组抗渗性均优于掺矿渣的 C2 与 C3 组,这说明偏高岭土对混凝土抗氯离子渗透性的改善效果比矿渣好。对比图 10 中的 C4 与 C8 可见,脱模和 28 d 龄期时,C8 组试块的氯离子扩散系数小于 C4 组,但在 90 d 龄期时却接近于 C4 组。由于试块 C4 和 C8 分别掺加了等量的偏高岭土和硅灰,所以这个结果表明,与偏高岭土相比,硅灰在早期对蒸养混凝土的抗氯离子渗透性更为有利,养护后期,这两种矿物掺合料在抗氯离子渗透性改善效果上相近。

综合上述结论可知,4 种矿物掺合料对蒸养混凝土传输性能的改善效果从高到低依次为硅灰、偏高岭土、矿渣、粉煤灰。

3.4 孔结构

为分析水胶比、偏高岭土掺量和矿物掺合料复掺对蒸养混凝土孔结构的影响,测试了各配合比试

块在 28 d 龄期的孔隙率,并对孔径分布进行了分析,结果见图 11 ~ 13 和表 4。

表4 各因素对孔径变化的影响分析 %

编号	总孔隙率	大孔(孔径 >30nm)		小孔(孔径 ≤30nm)	
		孔隙率	占总孔的比例	孔隙率	占总孔的比例
P0	13.19	3.94	29.87	9.25	70.13
P5	12.05	2.63	21.83	9.42	78.17
P10	11.38	2.26	19.86	9.12	80.14
P15	11.03	2.16	19.58	8.87	80.42
P20	11.24	2.23	19.84	9.01	80.16
W1	9.37	1.58	16.86	7.79	83.14
W2	11.03	2.16	19.58	8.87	80.42
W3	12.53	2.54	20.27	9.99	79.73
W4	13.32	3.01	22.60	10.31	77.40
C1	12.26	2.92	23.82	9.34	76.18
C2	9.28	2.36	25.43	6.92	74.57
C3	9.08	2.32	25.55	6.76	74.45
C4	11.02	2.18	19.78	8.84	80.22
C5	10.22	1.86	18.20	8.36	81.80
C6	9.57	1.73	18.08	7.84	81.92
C7	9.03	1.51	16.72	7.52	83.28
C8	10.68	1.97	18.45	8.71	81.55

3.4.1 水胶比影响 固定 15% 偏高岭土掺量,改变水胶比,测试蒸养混凝土在 28 d 龄期时的孔隙率,结果如图 11 和表 4 所示。由图 11 可见,当水胶比由 0.45 降至 0.30 时,总孔隙率由 13.32% 降至 9.37%,大孔和小孔孔隙率均下降,分别减少了 1.43% 和 2.52%。且从表 4 可知,随着水胶比的降低,小孔占总孔的比例随水胶比的降低而增加,大孔占总孔的比例随水胶比的降低而降低,这说明降低水胶比不仅减小了孔隙率,而且细化了孔径。

3.4.2 偏高岭土掺量的影响 固定水胶比 0.35,改变偏高岭土掺量(混凝土试块 P0 ~ P20),测试蒸养混凝土在 28 d 龄期时的孔隙率,结果如图 12 和表 4 所示。

由图 12 和表 4 可知,随偏高岭土掺量增加,总孔隙率逐渐降低;当掺 5% 偏高岭土时,蒸养混凝土大孔孔隙率从 3.94% 显著减少到 2.63%,小孔孔隙率甚至有微小的增加,使得小孔所占总孔的比例从 70.13% 显著增加到 78.17%,偏高岭土细化孔径效果特别明显。偏高岭土掺量超 15% 后,对孔结构的影响逐渐减小。可以认为,掺加适当比例的偏高岭土不仅能降低蒸养混凝土孔隙率,而且能细化孔径,

提高混凝土致密性。

3.4.3 矿物掺合料复合掺加的影响 固定矿物掺合料取代量为 30%,研究了复掺粉煤灰、矿渣、硅灰和偏高岭土对蒸养混凝土 28 d 龄期孔结构的影响,结果如图 13 和表 4 所示。

由图 13 可见,C7 的总孔隙率和大孔孔隙率均是最小的,由表 4 也可知 C7 小孔占总孔的比例最大,且 C7 掺加的偏高岭土含量最多,说明偏高岭土对改善孔结构是有利的。对比同时掺加偏高岭土和粉煤灰的 C4 ~ C7 可知,大孔和小孔孔隙率均随偏高岭土掺量增加而降低,这与 3.4.2 中的结论相一致,但此时偏高岭土掺量为 20% 时,试块孔结构最优,由此说明,不同情况下改善孔结构的最佳偏高岭土掺量也有所不同,但考虑到流动性,一般选取 15% 偏高岭土掺量为宜。对比图 13 中的 C2 与 C6 组、C3 与 C7 组可见,总孔隙率相差甚微,但掺矿渣的 C2 和 C3 组大孔孔隙较多。由此可知,相比于矿渣而言,偏高岭土对孔结构的改善效果更佳。对比图 13 中的 C4 与 C8 可见,硅灰与偏高岭土对孔结构的改善效果相当。

3.5 传输性能与孔结构的关系

根据各配合比试块传输性能和孔结构的测试结

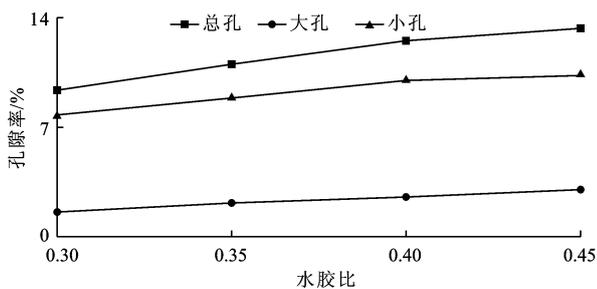


图 11 不同水胶比下的蒸养混凝土 28 d 孔隙率

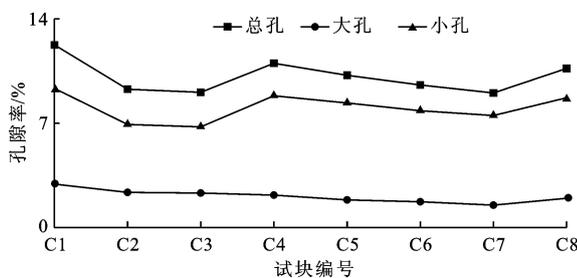


图 13 复掺矿物掺合料对蒸养混凝土孔隙率的影响

图 15 表示各编号试块在蒸养 28 d 龄期时毛细吸附系数随大孔孔隙率的变化情况。由图 15 可知,对不同配比的蒸养混凝土而言,毛细水吸附系数总体上随大孔孔隙率的降低呈减小趋势,通过数学方

果,将 28 d 龄期氯离子扩散系数、毛细水吸附系数与相对应的孔隙率绘制成散点图,发现混凝土传输性能与小孔孔隙率的相关性不大,但与大孔孔隙率的相关性显著,分别如图 14 ~ 15 所示。图 14 表示各个编号的试块在蒸养 28 d 龄期时氯离子扩散系数随大孔孔隙率的变化情况。由图 14 可知,对不同配比的试块而言,氯离子扩散系数总体上随大孔孔隙率的降低呈减小趋势,通过数学方法对氯离子扩散系数与大孔孔隙率的关系进行拟合。分析表明,采用线性函数对两者关系进行拟合的相关系数达到 0.87,拟合方程如式(3)所示。

$$D = 2.9574P - 3.8825 \quad (R = 0.87) \quad (3)$$

式中: P 为大孔孔隙率,%; D 为试块的氯离子扩散系数, $10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$; R 为相关系数。

方程式(3)表明,随大孔孔隙率的增大,各蒸养混凝土氯离子扩散系数呈线性增长趋势,与混凝土的配合比无关。这一结果与 Halamicikova 等^[15]提出的水泥砂浆氯离子扩散系数 D 与临界孔径 C_c 之间有显著的线性关系($R = 0.93$)相一致,但本文拟合的相关系数低于该文献,可能是因为文献采用的是砂浆,而本文采用的是混凝土,粗骨料数量和分布影响了氯离子扩散系数和大孔孔隙率之间关系的拟合结果。

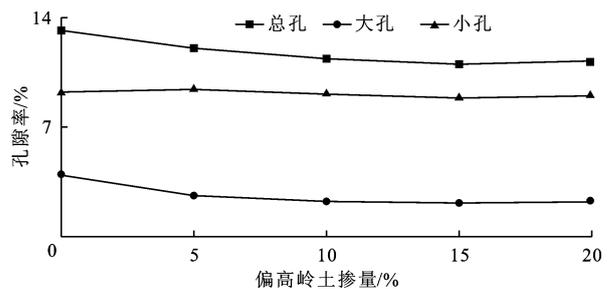


图 12 不同偏高岭土掺量蒸养混凝土 28 d 孔隙率

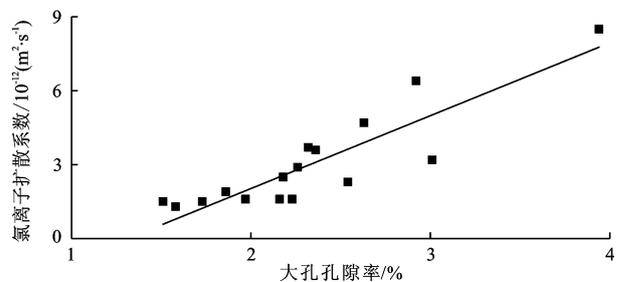


图 14 氯离子扩散系数与大孔孔隙率关系

法对毛细水吸附系数与大孔孔隙率的关系进行拟合。分析表明,采用线性函数对两者关系进行拟合的相关系数达到 0.89,拟合方程如式(4)所示。

$$S = 0.00624P + 0.00108 \quad (R = 0.89) \quad (4)$$

式中: P 为大孔孔隙率,%; S 为试块的毛细水吸附系数, $\text{mm}/\text{min}^{0.5}$; R 为相关系数。

方程式(4)表明,各蒸养混凝土毛细水吸附系数随大孔孔隙率增大而线性升高,与混凝土的配合比无关。这是因为水分在通常情况下主要通过孔隙液体表面张力产生的毛细吸附力侵入混凝土材料的内部^[16]。

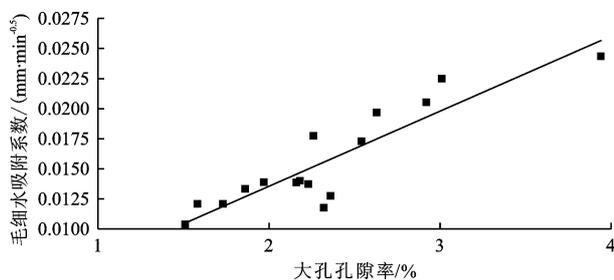


图 15 毛细水吸附系数与大孔孔隙率关系

上述结果表明,降低大孔孔隙率可有效改善蒸养混凝土的传输性能,而偏高岭土等矿物掺合料可细化蒸养混凝土孔径,从而改善了蒸养混凝土的自密性。

4 结 论

(1)混凝土水胶比降低,孔隙率和孔径随之减小,显著降低了蒸养混凝土毛细水吸附系数和氯离子扩散系数。当水胶比由 0.45 降到 0.30,蒸养混凝土毛细水吸附系数下降了 47.8%,氯离子扩散系数下降了 56.2%。

(2)增加偏高岭土掺量可降低蒸养混凝土毛细水吸附系数和氯离子扩散系数,28 d 龄期前降低速率较快。适当地掺加偏高岭土可有效改善混凝土的传输性能,偏高岭土掺量小于 15% 时,对蒸养混凝土的改善效果更佳。

(3)矿物掺合料对蒸养混凝土传输性能的改善效果与龄期有关。在脱模和 28 d 龄期,改善效果从高到低依次为硅灰、偏高岭土、矿渣、粉煤灰。90 d 养护龄期时,偏高岭土与硅灰相当,且这两种矿物掺合料均优于矿渣及粉煤灰。

(4)混凝土孔结构与传输性能关系密切,减小水胶比、单掺或复掺偏高岭土等矿物掺合料可有效降低孔隙率,细化孔径,从而改善混凝土传输性能。

参考文献:

[1] 熊蓉蓉,龙广成,宋军伟. 蒸养条件下掺矿物掺合料水泥石复合体的水化特性研究[J]. 硅酸盐通报,2018,37

(11): 263 - 269.

[2] ZOU Chao, LONG Guangcheng, MA Cong, et al. Effect of subsequent curing on surface permeability and compressive strength of steam-cured concrete [J]. Construction and Building Materials, 2018, 188(8): 424 - 432.

[3] HO D W S, CHUA C W, TAM C T. Steam-cured concrete incorporating mineral admixtures [J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(4): 595 - 601.

[4] HOOTON R D, TITHERINGTON M P. Chloride resistance of high - performance concretes subjected to accelerated curing [J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(9): 1561 - 1567.

[5] GESOĞLU M. Influence of steam curing on the properties of concretes incorporating metakaolin and silica fume [J]. Material Structure, 2010, 43(8): 1123 - 1134.

[6] 董必钦,庄钊涛,顾镇涛,等. 矿渣混凝土氯离子渗透的电化学阻抗谱分析[J]. 深圳大学学报(理工版), 2019, 36(3): 268 - 273.

[7] 邵俊丰,张世义,范颖芳. 复掺矿物掺合料混凝土抗氯盐侵蚀与抗冻性试验研究[J]. 混凝土, 2017, 4(2): 38 - 42.

[8] 胡瑾,王强,杨建伟. 钢渣-硅灰复合矿物掺合料对混凝土性能的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2015, 55(2): 145 - 149.

[9] 熊蓉蓉,龙广成,谢友均,等. 矿物掺合料对蒸养高强浆体抗压强度及孔结构的影响[J]. 硅酸盐学报, 2017, 45(2): 175 - 181.

[10] HAN Fanghui, SONG Shaomin, LIU Juanhong, et al. Properties of steam-cured precast concrete containing iron tailing powder [J]. Powder Technology, 2019, 345(1): 292 - 299.

[11] 李一鸣,贺智敏,沈黄冰,等. 偏高岭土对蒸养混凝土界面区显微硬度及统计分布的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(1): 179 - 185.

[12] 卢都友,张少华,徐江涛,等. 石灰石微粉与偏高岭土复合对水泥强度和水化产物的影响[J]. 硅酸盐学报, 2017, 45(5): 662 - 667.

[13] 刘伟,邢锋,谢友均. 矿物掺合料对混凝土毛细吸水性的影响[J]. 深圳大学学报(理工版), 2008, 25(3): 303 - 307.

[14] 贺智敏,龙广成,谢友均,等. 蒸养混凝土的表层伤损效应[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(6): 994 - 1001.

[15] HALAMICKOVA P, DETWILER R J, BENTZ D P, et al. Water permeability and chloride ion diffusion in portland cement mortars: Relationship to sand content and critical pore diameter [J]. Cement and Concrete Research, 2000, 25(4): 790 - 802.

[16] 程宝娟,王立成,鲍玖文,等. 养护条件对混凝土毛细吸水性能的影响[J]. 水利水运工程学报, 2016, 11(6): 76 - 82.