

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.05.013



早期受冻掺合料混凝土服役性能试验研究

胡晓鹏, 杨兰, 杨超, 朱勇, 赵楠

(西安建筑科技大学 土木工程学院, 西安 710055)

摘要:为评定早期冻融损伤对混凝土结构服役期承载性能及耐久性能的影响规律,通过不同掺合料种类及掺量、不同起冻时刻的混凝土早期受冻试验,对比了不同受冻时刻混凝土服役期的表面损伤形态,研究了起冻时刻、掺合料掺量对早期受冻混凝土服役期抗压强度、劈拉强度、动弹模量、渗透性的影响规律,探讨了早期受冻对混凝土服役性能的损伤机理。结果表明:起冻时刻对混凝土抗压强度、劈拉强度、动弹模的影响程度均表现为 $2\text{ h} > 0.5\text{ h} \approx 8\text{ h} > 1\text{ d} > 3\text{ d}$,劈拉强度损失最明显,动弹模损失次之,抗压强度损失最不显著;掺入 20% 粉煤灰或 15% 矿粉或 20% 煤矸石的混凝土早期受冻后的强度和动弹模损失最小,略小于普通混凝土;随着掺合料掺量的增加,同时刻受冻混凝土试件的抗渗水性和抗渗气性变差;未冻混凝土试件的抗渗性最好,3 d 受冻试件次之,1 d 受冻试件再次,而 0.5、2、8 h 受冻试件最差甚至超出 AutoClam 设备的测试范围。

关键词:掺合料混凝土;早期受冻;服役期;起冻时刻

中图分类号:TU528.01 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2017)05-0093-07

Experimental analysis of service performance of early frost admixture concrete

Hu Xiaopeng, Yang Lan, Yang Chao, Zhu Yong, Zhao Nan

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, P. R. China)

Abstract: In order to evaluate the influence rules of early frost damage on the bearing property and durability of concrete structure in service period, early frost experiments considering different admixtures and different freezing times were carried out. The surface damage forms of different freezing times were compared. The influence rules of freezing times and mineral admixtures on compressive strength, splitting tensile strength, dynamic elastic modulus and permeability of early frost admixture concrete were studied. The damage mechanism of early frost on service performance was discussed. The results showed that the damage degree of freezing time on compressive strength, splitting tensile strength and dynamic elastic modulus embodied as $2\text{ h} > 0.5\text{ h} \approx 8\text{ h} > 1\text{ d} > 3\text{ d}$. The most obvious loss was the splitting tensile strength, and the next was the dynamic elastic modulus. The least loss was the compressive strength. When 20% fly ash or 15% slag or 20% coal gangue was incorporated into concrete, the strength loss and the dynamic elastic modulus loss was the smallest and smaller than that of common concrete. With the increase of admixture, the anti-water-permeability and anti-air-penetration of concrete specimen at same freezing time

收稿日期:2016-02-20

基金项目:国家自然科学基金(51308441、51678473);陕西省自然科学基金(2016JM5073)

作者简介:胡晓鹏(1980-),男,博士,副教授,主要从事混凝土结构耐久性能研究,(E-mail)shs339@sina.com。

Received:2016-02-20

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51308441, 51678473); Natural Science Basic Research Plan in Shaanxi Province of China(No. 2016JM5073)

Author brief: Hu Xiaopeng(1980-), PhD, associate professor, main research interest: durability of concrete structure, (E-mail)shs339@sina.com.

were worsen. The anti-permeability of unfrozen concrete was the best, and the next is 3-day frozen concrete. The third is 1-day frozen concrete, and the anti-permeability of 0.5-hour frozen and 2-hour frozen and 8-hour frozen concrete were the worst and even beyond the test range of AutoClam equipment.

Keywords: admixture concrete; early frost; service period; freezing time

秋末冬初、冬末春初季节交替时气候条件多变,气温突变的可能性大为增加,处于施工期的混凝土结构突然受冻情况时有发生,造成混凝土水化过程减缓、内部微裂缝开展等不利影响,此种早期冻伤大多无法修复,对混凝土结构服役期的承载性能和耐久性能造成难以弥补的损害。多年来,混凝土浇筑过程中的受冻、硬化过程中的受冻一直备受关注。文献[1-4]结合现有的混凝土冻融破坏理论,分新浇筑混凝土、硬化过程中混凝土、幼龄期混凝土 3 个阶段阐述了混凝土早期冻融损伤的破坏机理。文献[5-12]通过混凝土的早期冻融试验研究了早期冻伤混凝土的质量损失、抗压强度损失和孔隙分布变化。然而,目前混凝土早期冻融损伤的研究大多基于《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009)进行混凝土材料的早期冻融试验,冻融循环时间短(2~4 h 一个循环),冻融温度固定(-17~-8 ℃),循环次数多。这种试验环境与实际工程条件存在明显差异,将硬化混凝土冻融试验方法用于研究形态多变、性能时变的早期混凝土冻融损伤规律显然不合理。另外,目前混凝土早期冻融损伤方面的研究较少涉及掺合料,与当前的实际工程不符。模拟实际工程环境研究早期受冻掺合料混凝土的服役期性能,对于准确评定混凝土的早期冻融损伤、早期受冻混凝土结构的承载性能及耐久性能具有重要的理论意义。

笔者以-5 ℃的环境下冷冻 1 次、冻融持续时间 8 h 为试验环境模拟混凝土材料的早期突然受冻环境,通过测试不同起冻时刻掺合料混凝土的服役性能(包括表面形态、抗压强度、劈拉强度、动弹性模量、渗透性),分析早期受冻对掺合料混凝土服役性能的影响规律和损伤机理。

1 试验概况

1.1 原材料

水泥为普通硅酸盐水泥。掺合料:粉煤灰为 II 级灰,其细度模数为 0.18、烧失量为 5%;矿粉为 S105 级矿粉;煤矸石粉为秦岭水泥集团燃烧活化过的自然矸石。掺合料 X 射线荧光光谱分析(XRF)结果见表 1。细骨料为沔河河沙,细度模数为 2.9,

堆积密度为 1 450 kg/m³。粗骨料为粒径为 1~2 cm 的碎石,压碎指标为 12%,堆积密度为 1 400~1 700 kg/m³。高效减水剂为 RD-N 型高效减水剂,减水效果在 20%左右,1 h 内无塌落度损失,掺入量为胶凝材料质量的 1%。

表 1 水泥与掺合料 XRF 分析结果

材料	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	Cl ⁻
粉煤灰	47.55	26.29	7.39	4.89	0.76	0.82	0.61	
矿粉	29.73	13.11	36.89	0.27	7.33	1.22	0.56	0.049
煤矸石	35.83	21.36	14.14	3.82	3.86	2.77	0.13	0.015

1.2 配合比

试验掺合料种类共 3 种:粉煤灰、矿粉、煤矸石,均为单掺混凝土,掺合料掺量参照目前实际工程的常规用量确定。其中,粉煤灰掺量(掺合料质量占胶凝材料质量的百分比)为 10%、20%和 30%,矿粉掺量为 15%、30%和 45%,煤矸石掺量为 10%、20%和 30%。各种掺合料混凝土的配合比见表 2。

表 2 掺合料混凝土的配合比

编号	掺合料种类及掺量	水泥	砂	石子	水	减水剂	掺合料
OC	不掺掺合料	320	725	1 185	170	1.6	
FC1	10%粉煤灰	288	725	1 185	170	1.6	32
FC2	20%粉煤灰	256	725	1 185	170	1.6	64
FC3	30%粉煤灰	224	725	1 185	170	1.6	96
SC1	15%矿粉	272	725	1 185	170	1.6	48
SC2	30%矿粉	224	725	1 185	170	1.6	96
SC3	45%矿粉	176	725	1 185	170	1.6	144
GC1	10%煤矸石	288	725	1 185	170	1.6	32
GC2	20%煤矸石	256	725	1 185	170	1.6	64
GC3	30%煤矸石	224	725	1 185	170	1.6	96

1.3 试件成型与养护

浇筑振捣成型好的试件在室外自然环境(10 ℃左右)下分别养护至 0.5 h(初凝前)、2 h(初凝与终凝之间)、8 h(终凝后)、1、3 d 后,将混凝土试件置于

-5℃的气候模拟试验箱内冷冻 8 h 后取出,浇筑振捣成型时预留各种编号不冻融混凝土试件作为对比试件,将所有试件在室内自然环境下养护至龄期 1 a 后测试其抗压强度、劈拉强度、动弹性模量、渗透性。其中,混凝土抗压强度、劈拉强度测试采用 100 mm×100 mm×100 mm 的试件,每种编号混凝土 6 个,3 个测试抗压强度,3 个测试劈拉强度;动弹性模量测试采用 100 mm×100 mm×400 mm 的试件,每种编号混凝土 6 个,3 个采用共振法测试相对动弹性模量,3 个采用超声法测试相对动弹性模量;渗透性测试采用 150 mm×150 mm×150 mm 的试件,每种编号混凝土 6 个,3 个测试渗气性,3 个测试渗水性。

1.4 试验方法与冻融损伤评价指标

依据《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)^[13]的技术要求,测试混凝土的抗压强度和劈拉强度,计算其抗压强度损失率和劈拉强度损失率(损失率为冻融后强度、未冻强度间的差值与未冻强度的比值)。共振法和超声法常用于测试冻融后混凝土的相对动弹性模量,两者测试结果常存在差异,参照文献[14-15]的技术要求,使用共振仪和超声波检测仪分别测试并计算混凝土的动弹性模量。采用 Autoclam 测试仪分别测试试件的渗气性和渗水性;以测试时间为 x 轴,以第 5~15 min 压力的自然对数为 y 轴,所得直线的斜率为空气渗透性系数 K_a ;以测试时间的平方根为 x 轴,以第 5~15 min 的渗水量为 y 轴,所得直线的斜率为吸水性系数。各性能参数采用 3 个试件测值的算术平均值,3 个测值中的最大值或最小值中如有一个与中间值的差值超过中间值的 15% 时,则取中间值。

2 试验结果分析

2.1 表面形态

将各试件进行切割抛光,图 1 给出了不同的起冻时刻 t 混凝土 OC 切割抛光后的表面形态。从图 1 可以看出:未冻混凝土中无明显的肉眼可见裂缝,粗骨料与浆体间连接紧密,孔隙分布均匀;0.5、2 h 受冻混凝土试件四周出现明显的脱落,浆体自身、浆体与裂缝间有肉眼可见裂缝,浆体强度较低造成细骨料颗粒显露明显;8 h 受冻混凝土试件四周出现轻微脱落,浆体自身、浆体与裂缝间有肉眼可见裂缝但裂缝宽度明显小于 0.5 h 和 2 h 受冻试件;1、3 d 受冻混凝土试件完整度较好,但个别粗骨料与浆体间有细微裂缝。

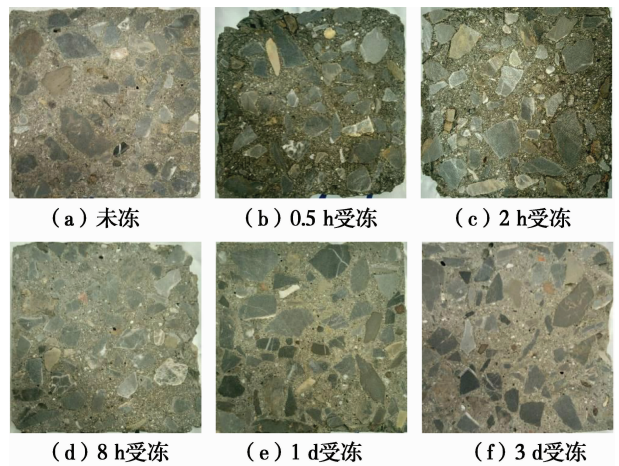


图 1 不同起冻时刻混凝土 OC 的表面形态

Fig.1 Surface morphology of OC at different freezing times

2.2 强度损失分析

图 2、图 3 给出了不同的起冻时刻 t 对各种掺合料混凝土抗压强度 f_{cu} 和劈裂抗拉强度 f_t 的影响情况。

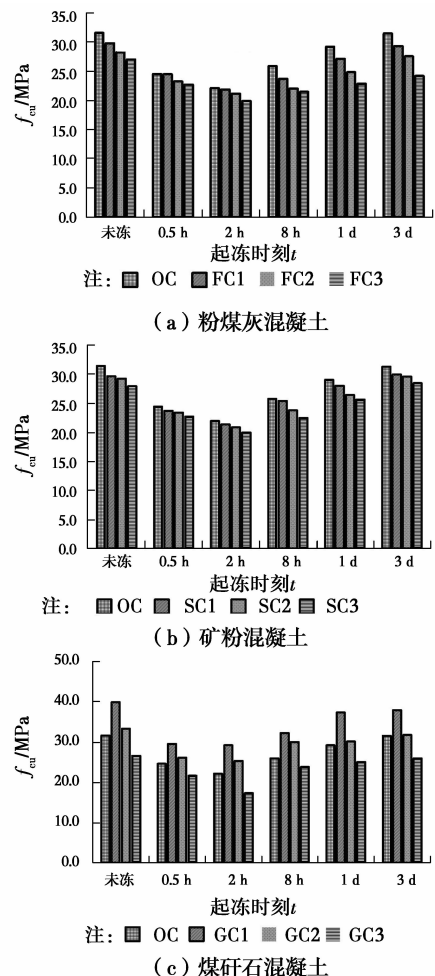


图 2 不同起冻时刻掺合料混凝土的抗压强度 f_{cu}

Fig.2 Compressive strength of concrete at different freezing times

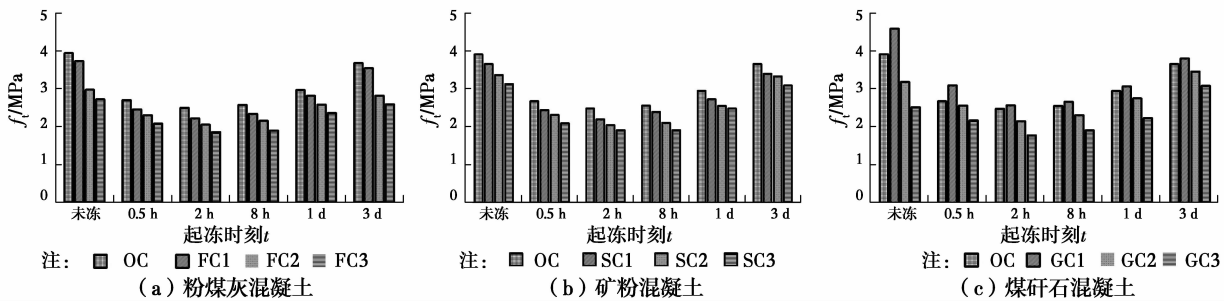
图 3 不同起冻时刻掺合料混凝土的劈拉强度 f_t

Fig. 3 Split tensile strength of concrete at different freezing times

从图 2、图 3 可以看出：

1) 抗压强度损失程度为：2 h > 0.5 h > 8 h > 1 d > 3 d，相应的受冻混凝土抗压强度损失率约为 28.3%、20.3%、18.0%、8.8%、3.1%；混凝土劈拉强度损失程度为：2 h > 8 h > 0.5 h > 1 d > 3 d，相应的受冻混凝土抗压强度损失率约为 36.3%、33.6%、28.2%、21.2%、2.6%。得到的早期受冻对混凝土强度的影响规律与文献[1, 6-7]的研究结果一致，但损伤程度有一定差异，究其原因可能是试验材料、试验温度条件的差异引起的。对比发现，早期受冻造成的混凝土抗拉强度损失比抗压强度损失更显著。

2) 随着掺合料的掺入，不同时刻早期受冻混凝土抗压强度、劈拉强度损失率略有不同，大致情况为：FC1 > OC > FC3 > FC2，SC2 > OC > SC3 > SC1，GC1 > OC > GC3 > GC2。如 2 h 受冻 OC、FC1、

FC2、FC3 混凝土的抗压强度损失率分别为 26.6%、30.1%、25.2%、26.5%，其相应的劈拉强度损失率分别为 36.5%、40.6%、31.1%、32.0%；2 h 受冻 OC、SC1、SC2、SC3 混凝土的抗压强度损失率分别为 29.6%、27.5%、30.1%、28.7%，其相应的劈拉强度损失率分别为 39.4%、38.7%、40.1%、39.1%；2 h 受冻 OC、GC1、GC2、GC3 混凝土的抗压强度损失率分别为 30.1%、34.7%、24.0%、26.8%，其相应的劈拉强度损失率分别为 36.5%、43.8%、29.3%、32.4%。可以看出：掺入 20% 粉煤灰或 15% 矿粉或 20% 煤矸石的混凝土早期受冻后的强度损失率最小，均小于普通混凝土；掺合料的适量掺入可减轻混凝土的早期冻融损伤。

2.3 相对动弹性模量分析

表 3 给出了不同的起冻时刻 t 共振法和超声法混凝土动弹性模量 E_d 的测试分析结果。

表 3 相对动弹性模量测试计算结果

Table 3 Calculation results of relative dynamic elastic modulus

%

编号	共振法						超声法					
	未冻	0.5 h	2 h	8 h	1 d	3 d	未冻	0.5 h	2 h	8 h	1 d	3 d
OC	100	79.1	78.5	91.2	92.3	94.9	100	85.1	79.1	92.5	93.6	96.3
FC1	100	78.9	69.9	88.3	91.6	94.2	100	79.5	70.1	89.4	92.9	95.6
FC2	100	82.1	74.6	90.5	91.8	94.5	100	82.9	75.0	91.7	93.1	95.9
FC3	100	70.6	65.3	85.4	90.0	93.1	100	70.8	65.3	86.4	91.2	94.5
SC1	100	79.3	72.2	87.3	88.5	91.1	100	80.0	72.5	88.4	89.6	92.4
SC2	100	76.3	67.7	85.2	88.4	90.8	100	76.8	67.8	86.2	89.5	92.0
SC3	100	68.4	63.4	82.5	86.8	89.8	100	68.5	63.3	83.3	87.8	91.0
GC1	100	80.5	71.1	90.4	93.9	96.6	100	81.2	71.4	91.6	95.3	98.1
GC2	100	83.9	76.0	92.7	94.1	96.9	100	84.8	76.5	94.0	95.5	98.4
GC3	100	71.8	66.3	87.4	92.2	95.5	100	72.1	66.3	88.5	93.5	97.0

从表 3 可以看出：

1) 两种方法反映出起冻时刻、掺合料对早期受

冻混凝土相对动弹性模量的影响规律相似，均能较好地描述早期受冻混凝土的损失程度。两种方法测

试结果差异较小,两者之间的差值最大值为1.5%。

2)各种编号混凝土受冻后的相对动弹模均表现为:2 h<0.5 h<8 h<1 d<3 d,即初凝与终凝间混凝土受冻动弹模损失最大,初凝前受冻次之,终凝后动弹性模量损失随着龄期的增加逐渐减少,3 d受冻混凝土的动弹性模量损失10%以内。得到的早期受冻对动弹性模量的影响规律与文献[8,11]的研究结果一致,损伤程度有一定的差异。

3)随着掺合料的掺入,不同时刻早期受冻混凝土动弹性模量损失均有不同程度的增大,损失程度大致情况为:FC3>FC1>OC>FC2,SC3>SC2>OC>SC1,GC3>GC1>OC>GC2。掺入20%粉煤灰或15%矿粉或20%煤矸石的混凝土早期受冻后的动弹性模量损失比不掺掺合料混凝土略小;掺入更多的掺合料后混凝土早期受冻后的动弹性模量损失明显增大。

2.4 渗透性分析

混凝土的渗水性和渗气性一定程度上影响混凝土结构的耐久性,混凝土的早期受冻对混凝土的渗透性的影响程度尚不清楚。表4给出了未冻、1 d及3 d受冻混凝土空气渗透性系数和水渗透性系数的测试结果。0.5、2、8 h的渗气性和渗水性均超过了AutoClam测试仪的测试范围,渗气性或渗水性更差。从表4可以看出:

表4 渗透性测试结果

Table 4 Test results of permeability

编号	空气渗透性系数/ (ln(mbar)·min ⁻¹)			水渗透性系数/ (10 ⁻⁷ m ³ ·min ^{-0.5})		
	未冻	1 d	3 d	未冻	1 d	3 d
OC	0.45	0.80	0.62	13.84	19.99	14.44
FC1	0.70	1.62	1.50	15.75	31.92	29.28
FC2	1.12	1.69	1.60	27.41	33.30	30.50
FC3	1.14	1.83	1.78	29.30	41.46	31.00
SC1	0.65	1.32	1.16	16.83	30.57	21.80
SC2	0.79	1.36	1.27	17.96	33.30	23.58
SC3	1.41	1.62	1.58	22.01	39.80	24.71
GC1	0.49	0.72	0.66	15.24	30.25	24.41
GC2	0.73	0.84	0.80	25.75	36.45	28.87
GC3	0.92	1.23	1.20	27.02	42.69	36.32

1)未冻试件、1 d受冻试件、3 d受冻试件相比,3 d受冻试件的空气渗透性系数和水渗透性系数均大于未冻试件,而1 d受冻试件的空气渗透性系数和水渗透性系数最大。0.5、2、8 h这3种时间受冻

后,混凝土的渗气性和渗水性更差,AutoClam设备加压的气体压强极短时间消散,设备所加的水很快完全渗入试件中,说明未冻试件的抗渗水性和抗渗气性最好,3 d受冻试件次之,1 d受冻试件再次,而0.5、2、8 h受冻试件更差。

2)随掺合料掺量的增加,未冻混凝土试件、同一时刻受冻混凝土试件的空气渗透性系数与水渗透性系数均增大,混凝土的抗渗水性和抗渗气性变差。

3 早期受冻对混凝土服役性能的影响及机理分析

3.1 起冻时刻的影响

起冻时刻对混凝土抗压强度、劈拉强度、动弹模、渗透性的影响程度表现为2 h>0.5 h≈8 h>1 d>3 d,这是因为:初凝后终凝前的混凝土(2 h)已部分失去可塑性但未完全固化,此时受冻产生的冻胀变形使混凝土在约束情况下内部产生应力,使其整体性和密实性遭到破坏,混凝土表面局部疏松脱落,浆体自身、浆体与粗骨料间出现明显的裂缝,随着混凝土标准养护后水化过程的继续完成极少量的混凝土材料冻胀损伤会自我修复,大多数损伤已无法修复形成永久损伤造成服役性能的明显损失,此时受冻造成混凝土抗压强度、劈拉强度、动弹性模量损失最明显,混凝土的抗渗水性和抗渗气性变差程度最明显。

初凝前的混凝土(0.5 h)受冻虽然由于大量可结冰水的存在造成此时的抗冻能力最差,但此时的混凝土材料尚处于流动可塑状态且水化程度亦极低,此时受冻产生的冻胀变形不会产生应力或产生极小的应力^[16],冻胀作用造成的部分损伤会随着混凝土标准养护后水化过程的继续完成而填充混凝土内部裂缝及孔洞,实现混凝土材料的自我修复,少量损伤形成永久损伤造成服役性能的损失,此时受冻造成混凝土强度与动弹模损失均小于初凝与终凝间受冻的混凝土,混凝土的抗渗水性和抗渗气性也优于初凝与终凝间受冻的混凝土。

随着混凝土龄期的增长,终凝后的混凝土(8 h、1 d、3 d)混凝土水化程度提高,混凝土强度增长明显,孔隙中的可冻水减少,混凝土的固相状态趋于稳定,抗冻能力逐渐增强,早期冻伤对混凝土服役性能(损伤程度、强度损失、动弹模损失、渗透性)的影响越来越小。

3.2 掺和料的影响

适量的掺和料的掺入造成水泥用量减少、水化

热降低^[17],掺和料颗粒填充了混凝土内部微孔,提高了整体的密实性,改善了孔隙结构;而且掺和料与一次水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 一起参与二次水化反应,生成新的产物改变了混凝土内部物质组份,并继续改善混凝土的内部结构,一定程度上提高了混凝土的抗冻性。

4 结论

1)未冻混凝土中无肉眼可见裂缝,粗骨料与浆体间连接紧密,孔隙分布均匀;终凝前受冻混凝土试件出现不同程度的疏松脱落,浆体自身、浆体与裂缝间有肉眼可见裂缝,细骨料颗粒局部暴露明显;终凝后受冻混凝土表面完好,浆体自身、浆体与粗骨料间的可见裂缝随龄期的增长明显减少。

2)早期起冻时刻对混凝土抗压强度、劈拉强度、动弹性模量的影响规律相似,大致表现为: $2\text{ h} > 0.5\text{ h} \approx 8\text{ h} > 1\text{ d} > 3\text{ d}$,劈拉强度损伤最明显,动弹性模量损伤次之,抗压强度损失表现最不显著。

3)掺入 20%粉煤灰或 15%矿粉或 20%煤矸石的混凝土早期受冻后的强度损失、动弹性模量损失程度最小,略小于普通混凝土。随着掺合料掺量的增加,未冻混凝土试件、同一时刻受冻混凝土试件的抗渗水性和抗渗气性变差。

4)共振法和超声法测定早期受冻混凝土动弹性模量的结果差异较小,两种方法均能较好描述早期受冻混凝土的损失程度。

5)未冻混凝土试件的抗渗水性和抗渗气性最好,3 d 受冻试件次之,1 d 受冻试件再次,而 0.5、2、8 h 受冻试件更差且超出 AutoClam 的测试范围。

参考文献:

[1] 冀晓东. 冻融后混凝土力学性能及钢筋混凝土粘结性能研究[D]. 辽宁 大连:大连理工大学,2007.
JI X D. The experimental study and theoretical analysis on the mechanical performance of concrete and bond behaviour between concrete and steel bar after freezing and thawing [D]. Dalian, Liaoning: Dalian University of Technology, 2007. (in Chinese)

[2] 崔静忠. 混凝土的早期受冻[J]. 混凝土,1983(6): 55-65.
CUI J Z. Early frost of concrete [J]. Concrete, 1983 (6): 55-65. (in Chinese)

[3] MIN T B, CHO I S, PARK W J, et al. Experimental study on the development of compressive strength of early concrete age using calcium-based hardening

accelerator and high early strength cement [J]. Construction and Building Materials, 2014, 64(3): 208-214.

- [4] WANG H Y, ZHA X X. Axial strength of CFST columns considering concrete age [J]. Advanced Steel Construction, 2014, 10(2): 139-150.
- [5] 董伟,申向东,赵占彪,等. 风积沙轻骨料混凝土冻融损伤及寿命预测研究[J]. 冰川冻土,2015,37(4): 1009-1015.
DONG W, SHEN X D, ZHAO Z B, et al. Study of the freezing-thawing damage and life prediction of aeolian lightweight aggregate concrete [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(4): 1009-1015. (in Chinese)
- [6] 巴恒静,张惠,赵亚丁. 早期受冻对混凝土强度的影响[J]. 低温建筑技术,2013(6):1-4.
BA H J, ZHANG H, ZHAO Y D. The effect of early-age frozen damage on compressive strength of concrete [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2013 (6):1-4. (in Chinese)
- [7] 汪青杰,张延年,刘旭峰,等. 冻融时间对早期混凝土抗压性能的影响试验[J]. 沈阳大学学报(自然科学版),2014,26(1):61-65.
WANG Q J, ZHANG Y N, LIU X F, et al. Experimental research on compressive property of crumb rubber concrete based on freezing and thawing time [J]. Journal of Shenyang University (Natural Science), 2014, 26(1): 61-65. (in Chinese)
- [8] 张延年,刘旭峰,徐驰,等. 龄期对冻融循环后混凝土影响试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2012,28(2):261-268
ZHANG Y N, LIU X F, XU C, et al. Experimental research of influence of age on concrete after freeze-thaw cycle [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2012, 28(2): 261-268(in Chinese)
- [9] 聂志平. 混凝土早期冻融循环后渗透性能的研究[D]. 沈阳:沈阳建筑大学,2011.
NIE Z P. Study on the permeability of concrete in the early stage of freezing and thawing cycles [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2011. (in Chinese)
- [10] 王钰. 施工期受冻混凝土与钢筋的力学性能研究[D]. 辽宁 大连:大连理工大学,2010.
WANG Y. Experimental study on mechanical properties between steel bar and frozen concrete during winter construction [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007. (in Chinese)
- [11] QIN X C, MENG S P, CAO D F, et al. Evaluation of

- freeze-thaw damage on concrete material and prestressed concrete specimens [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 125: 892-904.
- [12] MA Z M, WITTMANN F H, XIAO J Z, et al. Influence of freeze-thaw cycles on properties of integral water repellent concrete [J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science Edition)*, 2016, 31(4): 851-856.
- [13] 普通混凝土力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2002 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
Standard for test method of mechanical properties of ordinary concrete: GB/T 50081-2002 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002. (in Chinese)
- [14] 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准: GB/T 50082—2009 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
Standard test method for long term performance and durability of ordinary concrete: GB/T 50082-2009 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.
(in Chinese)
- [15] 国家建筑工程质量监督检验中心. 混凝土无损检测技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996.
National Construction Engineering Quality Supervision and Inspection Center. Non-destructive test technology of concrete [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1996. (in Chinese).
- [16] KAMEN A, DENARIE E, SADOUKI H, et al. Thermo mechanical response of UHPFRC at early age experimental study and numerical simulation [J]. *Cement & Concrete Research*, 2008, 38(6): 822-831.
- [17] 孟云芳, 睦克仁, 买文智. 复合矿物掺和料对混凝土的增强效应[J]. *建筑材料学报*, 2007, 10(6): 724-730.
MENG Y F, MU K R, MAI W Z. The enhanced effect of composite mineral admixture to concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2007, 10(6): 724-730. (in Chinese)

(编辑 胡英奎)