第 49 卷第 11 期
2021 年 11 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 49，No. 11
November，2021

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20210142

约束对单面盐冻混凝土表面损伤的影响及机理

高志浩，王 玲，赵 霞

(中国建筑材料科学研究总院有限公司，绿色建筑材料国家重点实验室，北京 100024)

摘 要：研究约束(膨胀约束、收缩约束)对单面盐冻混凝土表面损伤的影响及作用机理，测试了水灰比为 0.40 的自由态和约束态混凝土每 4 次盐冻循环的表面剥落量和首次盐冻循环降温过程中的混凝土应变，计算了混凝土表面冰层中的拉应力。结果表明：约束态混凝土表面剥落量比自由态混凝土大；约束态混凝土表面剥落量随膨胀约束应力增大而增加，受收缩约束应力影响较小。与自由态混凝土相比，约束态混凝土表面冰层中的拉应力较大且随膨胀约束应力增大而增大；根据“粘贴–剥落”理论计算并证明了膨胀约束导致冰层更易开裂，引发了冰层下混凝土发生更严重表面损伤。

关键词：约束态混凝土；单面盐冻；表面损伤；表面剥落量；表观热膨胀系数
中图分类号：TU528　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2021)11–2494–08
网络出版时间：2021–10–11

Influence of Restraint on Surface Damage of Concrete Under Single-Side Salt Freezing and Thawing

GAO Zhihao, *WANG Ling*, *ZHAO Xia*
(The State Key Laboratory of Green Building Materials, China Building Materials Academy, Beijing 100024, China)

Abstract: The effect of restraint (*i.e.*, expansion restraint and shrinkage restraint) on the surface damage of single-side salt freezing and thawing (SSFT) of concrete and its mechanism were investigated. After every four SSFT cycles and the strain during the cooling phase of the first SSFT cycle, the surface scaling was measured on the restrained concrete with a water-cement ratio of 0.40, and the tensile stress in the ice on the concrete surface was calculated. The results show that the surface scaling of restrained concrete is greater than that of free concrete, and it increases with the increase of the expansion restraint stress, but has little relationship with the shrinkage restraint stress. Compared to the free concrete, the tensile stress in the ice on the restrained concrete's surface is greater, and it is influenced by the expansion restraint stress positively. The results calculated based on the theory of “glue-spall” indicate that the expansion restrains cause the ice to crack more easily and more serious surface damage to concrete under the ice.

Keywords: restraint concrete; single-side freezing and thawing; surface damage; surface scaling; apparent thermal expansion coefficient

冬季降雪后，撒放在道面上的除冰盐与积雪融水形成盐溶液覆盖在混凝土上，造成单面盐冻破坏，混凝土出现严重的表面剥落和内损伤[1]，因此抗盐冻破坏能力是寒冷地区混凝土耐久性的一项重要参数[2]。实际工程中的混凝土构件可看作由若干个混凝土单元体组成，单元体与构件为局部和整体的关系。盐冻循环时，构件内单元体不仅要经受冻融循环过程产生的形变，还会受到周围混凝土单元体的约束作用，这时混凝土的形变与常规冻融试验中混凝土试件的自由形变有所不同[3–6]，也与外加荷载下的形变不同[7–8]。Setzer 等[9]最先注意到这一点，并认为忽略这种约束作用可能会导致试验结果

收稿日期：2021–02–25。　修订日期：2021–05–16。
基金项目：国家重点研发计划资助项目(2017YFB0309901)。
第一作者：高志浩(1992—)，男，博士研究生。
通信作者：王 玲(1968—)，女，教授。

Received date: 2021–02–25.　**Revised date:** 2021–05–16.
First author: GAO Zhihao (1992–), male, Doctoral candidate.
E-mail: 78775790@qq.com
Correspondent author: WANG Ling (1968–), female, Professor.
E-mail: lingwangcbma@qq.com

与实际情况不符，为此设计了一种混凝土约束装置，并申请了欧洲专利。

相比于较为成熟的自由态混凝土冻融研究，约束态混凝土盐冻研究在我国尚处于起步阶段。为深入研究约束态混凝土单面盐冻行为和机理，徐亚丁等[10]和高志浩等[11]设计了构造更简单、重复利用率更高的约束装置。利用约束装置进行的研究工作，定性地证明了自由态混凝土试件的盐冻试验由于没有考虑约束作用而低估了混凝土的表面损伤[6,12–13]。

盐冻损伤经典机理，如渗透压理论[14]等，多数致力于阐明由内至外的破坏过程。表面损伤机理中，多数研究着眼于不同浓度盐溶液对盐冻混凝土表面损伤的影响，如杨全兵等[15–16]和王发洲等[17]发现盐溶液结冰压越大，或盐溶液深度差越大，均导致混凝土表面损伤越大。

Valenza 等[18–20]提出的“粘贴–剥落”(glue-spall)理论从冰与混凝土的温度形变差异入手，研究冰层中拉应力的形成及裂纹扩展，认为冰层裂纹的发展是受冻混凝土发生表面剥落的起源。该理论成功解释了为何盐冻比水冻造成混凝土更大表面损伤。为利用该理论解释约束态混凝土单面盐冻表面损伤的机理，本研究利用设计的约束应力调控装置[11]，测试了约束态和自由态混凝土试件 28 次盐冻循环的表面剥落量，以及约束态和自由态混凝土首次盐冻循环降温过程中的应变，由应变–温度曲线计算混凝土表观热膨胀系数和混凝土表面冰层中的最大拉应力，根据“粘贴–剥落”理论获得了约束对混凝土单面盐冻表面损伤的影响及原因。

1　实验

1.1　原材料及混凝土配合比

P·I 42.5 水泥，化学组成见表 1，物理性能见表 2。天然河砂，细度模数为 2.68。粒径 5～10 mm 和 10～20 mm 的碎石按质量比 4:6 均匀混合为 5～20 mm 连续级配碎石。

混凝土配合比(质量比)为 *m* (水泥):*m* (水):*m* (砂):*m* (碎石)=360:145:810:995，水灰比=0.40。使用含固量 40%聚羧酸高性能减水剂调整混凝土坍落度至 150 mm 以利于浇筑，减水剂折固掺量为水泥质量的 0.17%。混凝土 28 d 抗压强度为 46.7 MPa。

表 1　水泥的化学组成

Table 1　Chemical composition of cement　　*w*/%

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2Oeq.	Loss	f-CaO
25.1	6.38	4.19	54.87	2.61	2.66	0.56	2.18	0.79

w is a mass fraction.

表 2　水泥的物理性能

Table 2　Physical properties of cement

Specific surface/($cm^2 \cdot g^{-1}$)	Mass fraction of water demand/%	Setting time/min		Flexural strength/MPa		Compressive strength/MPa	
		Initial	Final	3 d	28 d	3 d	28 d
346	24	169	253	4.0	7.3	25.1	54.0

1.2　自由态混凝土的试模和试件制备

自由态混凝土成型采用符合 JG 237—2008《混凝土试模》规定的圆柱体铸铁试模，内径 100 mm、高 70 mm。

混凝土搅拌均匀后，分两层浇筑到圆柱体试模中。浇筑约 1/2 高度时，把中部粘贴有电阻应变片的应变锚杆(如图 1)放置在水平面的中心位置，其两端距离试模表面各约 12.5 mm。然后浇筑剩余混凝土，并用振动台振动 10 s 以保证混凝土充满整个试模。CF0 组试件共 5 个，成型 1 d 后脱模，试件标准养护至 28 d 后进行盐冻试验。

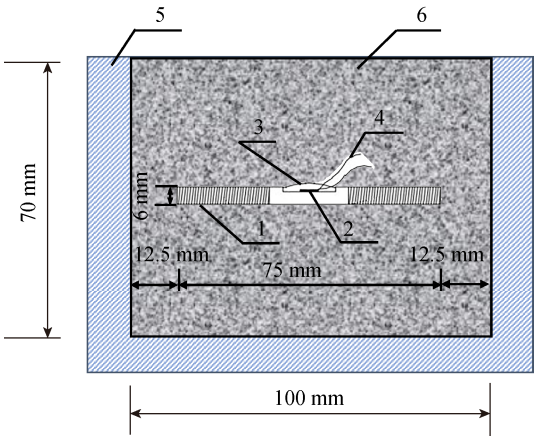
1.3　约束态混凝土的试模、约束装置和试件制备

约束态混凝土的试模及约束装置见图 2，全部采用 304 不锈钢制作。

图 2 中内径 100 mm、高 70 mm 的钢环在浇筑混凝土时充当圆柱体混凝土试模。在混凝土硬化后经历盐冻循环的过程中，当温度升高时，钢环充当约束环提供膨胀约束，限制升温时的混凝土体积膨胀。约束环厚度 *d* 由 1 mm 增加至 4 mm、8 mm，膨胀约束应力分别增大 280%和 410%[4–5]。

图 2 中有 24 根直径 6 mm 的钢锚栓，沿垂直方向分 3 层、每层 8 根沿环向均布于约束环上，钢锚栓与约束环间无联接，且指向约束环轴心。混凝土硬化后经历盐冻循环的过程中，当温度下降时，钢锚栓充当约束锚栓提供收缩约束，限制降温时的混凝土体积收缩。约束锚栓伸入混凝土长度(锚栓约

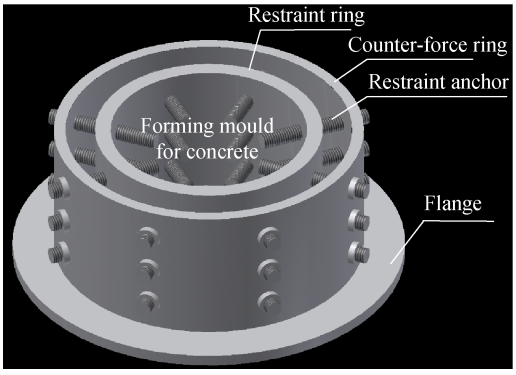
束长度) l 由 28 mm 增加至 33 mm，收缩约束应力增大 26%[4–5]。



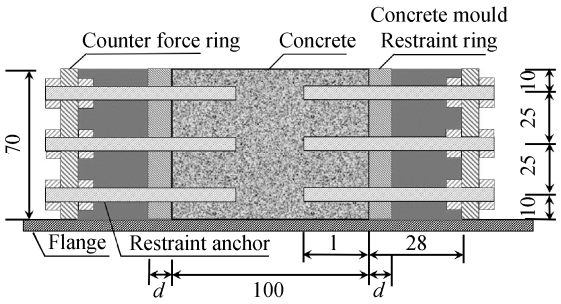
1—Strain anchor; 2—Strain gauge; 3—Waterproofer; 4—Wire; 5—Cylindrical cast iron mould; 6—Concrete.

图 1 自由态混凝土试模和埋置的应变锚杆示意图

Fig. 1 Schematic diagram of mould for free concrete and the embedded strain anchor



(a) Restraint device



(b) Sectional view (mm)

图 2 约束态混凝土的试模和约束装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of mould and restraint device for restraint concrete

图 2 中，位于约束装置最外圈的是反力环，作用是固定约束锚栓。位于约束装置底部的法兰的作用是充当底模，为盐冻循环混凝土试件提供测试面，它与约束环底部通过螺丝连接。

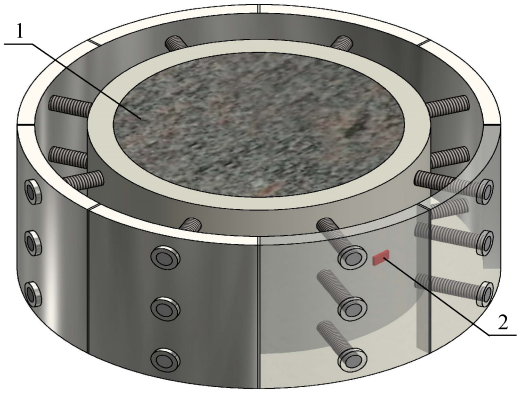
改变约束环厚度 d 和锚栓约束长度 l，得到 4 种约束组合，相应得到 4 组具有相同配合比但约束组合不同的约束态混凝土试件(见表 3)，对比用的相同配合比自由态混凝土试件 CF0 也列于表中。

表 3 混凝土试件编号及其约束组合

Table 3 Concrete specimens' number and their restraint parameters

Concrete	Sample	Restraint combination
Free concrete	CF0	d=0 mm, l=0 mm
Restrained concrete	TR1-28	d=1 mm, l=28 mm
	TR4-28	d=4 mm, l=28 mm
	TR8-28	d=8 mm, l=28 mm
	TR8-33	d=8 mm, l=33 mm

混凝土搅拌均匀后，一次浇筑到约束装置的约束环中，并用振动台振动 10 s 以保证混凝土穿过锚栓充满整个试模。成型 1 d 后，只拆除约束装置底部的法兰，不拆除约束装置其他部分。将混凝土试件(带有约束环、约束锚栓和反力环)放入养护室中标准养护至 28 d。在约束环外侧沿高度中心位置处对称粘贴 2 个环向应变片并做好防水保护后，再进行盐冻试验，应变片粘贴位置如图 3 所示。约束态混凝土试件共 4 组，每组 5 个试件。



1—Concrete; 2—Strain gauge.

图 3 约束态混凝土试件及约束环外侧的应变片

Fig. 3 Restrained concrete and strain gauge outside the restraint ring

1.4 盐冻试验及参数测试

1) 将表 3 所列混凝土试件放入 3%NaCl 溶液中预吸溶液 7 d 后取出。除试件端头的测试面以外，其他表面用保温棉包覆，防止热量通过这些表面传入混凝土试件内部。

2) 将试验槽放入单面盐冻试验机内，试验槽底部放置高 5 mm 的垫片，再将混凝土试件测试面朝下放置在垫片上。向试验槽中注入质量分数 3% 的 NaCl 溶液至溶液面高出试验槽底部约 10 mm，盐冻试验过程中保持试件测试面始终能接触到 NaCl 溶液。

3) 将所有应变片的导线接入应变仪。启动盐冻试验机，按照图4的温度制度开始28次单面盐冻试验。当试验机内温度稳定到约 15 ℃时，开始记录应变数据。

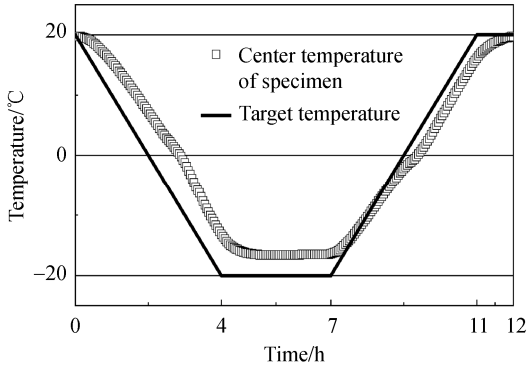


图 4　单次冻融循环温度制度曲线

Fig. 4　Temperature regime for one freezing and thawing cycle

4) 用于测试表面剥落量的试件(每组 3 个)每 4 个循环取出 1 次，收集剥落物，烘干后用电子天平称重记录，精确至 0.01 g。按式(1)计算试件第 n 次盐冻循环后的表面剥落量，并取 3 个试件的平均值。

$$w_n = \sum \mu_n / S \tag{1}$$

式中：w_n为第 n 次盐冻循环后的表面剥落量，g/m^2；$\sum \mu_n$ 为 n 次盐冻循环后表面剥落物的质量之和，g；S 为试件测试面的面积，m^2。

5) 应变仪实时采集混凝土试件(每组 2 个)盐冻循环中的应变。对约束态混凝土，采集约束环表面粘贴的环向应变片产生的应变。对自由态混凝土，采集预埋在试件中心应变锚杆上应变片产生的应变，其值等同于使用环向应变片测试的应变。应变测试精度为 0.01×10^{-6}，采样频率为 1 次/ min。

2　结果与讨论

2.1　约束对表面损伤的影响

约束态混凝土试件(4 组)和自由态混凝土试件(1 组)的表面剥落量随盐冻循环次数变化曲线如图 5 所示。随循环次数增加，5 组混凝土的表面剥落量 w_n 均不断增加。4 次循环后，自由态混凝土与约束态混凝土的表面剥落量即显现出差距。对比图 5 中 TR1-28、TR4-28 和 TR8-28 试件表面剥落量发现，随约束环厚度 d 值增大，混凝土表面剥落量增加，即混凝土试件的表面剥落量随膨胀约束应力增大而增加。对比 TR8-28 和 TR8-33 试件表面剥落量发现，当固定膨胀约束，仅改变收缩约束时，二者的 w_{28} 差距不大(约为 4.4%)，这表明收缩约束对混凝土表面剥落量影响不明显。

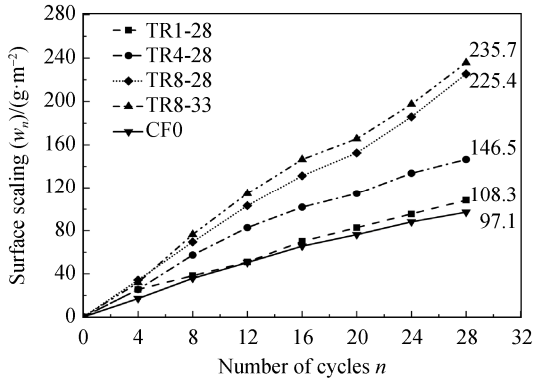


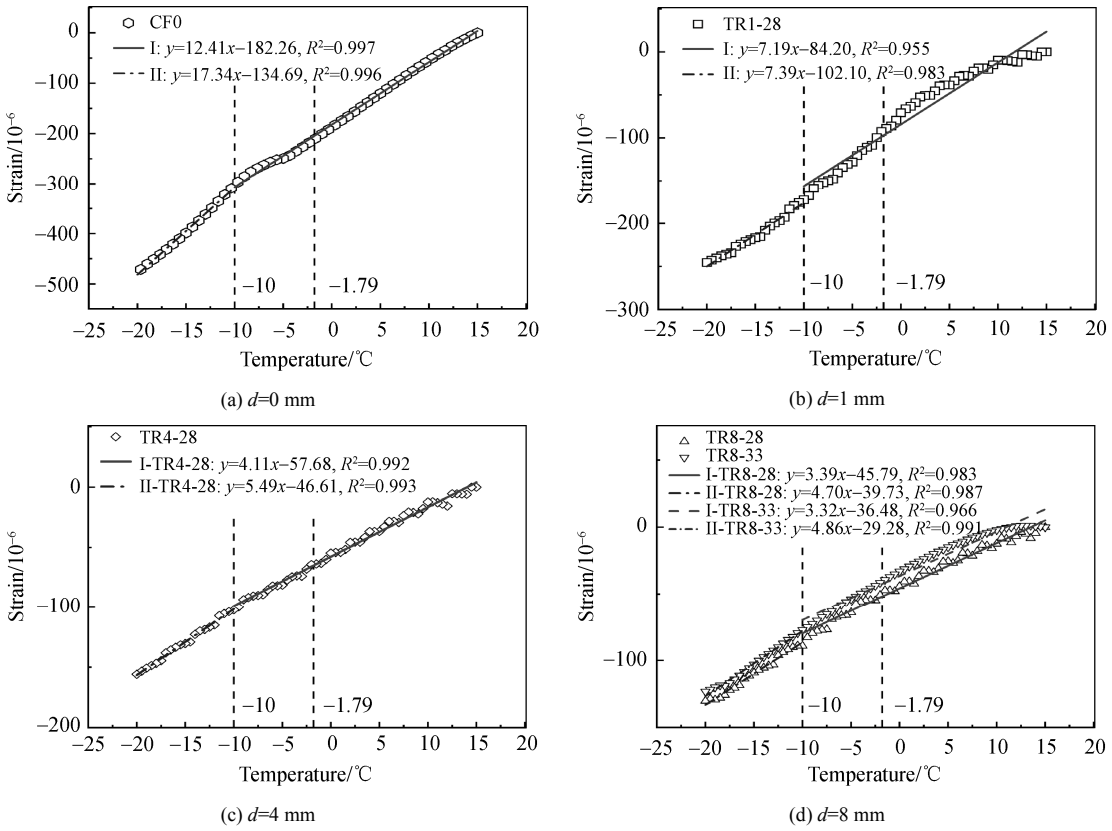
图 5　混凝土表面剥落量随循环次数变化曲线

Fig. 5　Variation of surface scaling of concrete with the number of cycles

2.2　约束对混凝土表观热膨胀系数的影响

图 6 显示了混凝土试件在首次盐冻循环降温阶段的应变发展情况。

由图 6 可以看出，随温度降低，自由态和约束态试件应变均从 0 开始反向增加，表明试件处于不断收缩状态。在不同温度段里，混凝土产生形变的原因各异。由于 3%NaCl 溶液的液相线温度约为 –1.79 ℃[18–19, 21]，温度降至–1.79 ℃之前混凝土试件表面仅暴露在低温盐水中，只存在温降收缩。温度低于–1.79 ℃时，溶液中开始出现冰相。冰的体积分数较低时，冰中不存在拉应力[19,22]，混凝土仍旧只存在温降收缩。随温度继续下降，冰水混合相中冰的体积分数不断增加，冰层中应力开始累积。温度下降到约–10 ℃时，冰的体积分数达到 77%以上[19]，冰层积累的应力开始变为拉应力[22]。因此，将图 6 的曲线分 2 个温度区间分别进行拟合，分别为冰层无拉应力阶段(15～–10 ℃)和冰层里产生拉应力阶段(–10～–20 ℃)。拟合直线的斜率即为试件在该温度区间的表观热膨胀系数 α_C[23]，即温度每下降 1 ℃混凝土试件长度的增加量与原长度的比值，结果见表 4。



(a) d=0 mm (b) d=1 mm

(c) d=4 mm (d) d=8 mm

图 6 试件首次循环降温过程中应变随温度变化情况

Fig. 6 Plot of concrete strain versus temperature during the cooling phase of the first F-T cycle

表 4 不同温度区间里混凝土试件的表观热膨胀系数

Table 4 Apparent thermal expansion coefficient α_C of specimens in different temperature ranges

Sample	α_C(15 ℃–−10 ℃) /10^{-1} ℃$^{-1}$	R^2	α_C(−10 ℃–20 ℃) /10^{-6} ℃$^{-1}$	R^2
CF0	12.41	0.997	17.34	0.996
TR1-28	7.19	0.955	7.39	0.983
TR4-28	4.11	0.992	5.49	0.993
TR8-28	3.39	0.983	4.70	0.987
TR8-33	3.32	0.966	4.86	0.991

从表 4 可见，CF0 试件在 2 个温度区间里的 α_C 均明显大于 4 组约束态试件，即约束态与自由态混凝土的盐冻变形存在较大差异。比较 TR1-28、TR4-28、TR8-28 试件的 α_C 发现，随约束环厚度 d 增加，约束态混凝土试件 α_C 减小，且明显小于自由态试件 α_C，约束态试件 α_C 随 d 值增加而减小。比较 TR8-28、TR8-33 试件的 α_C 发现，α_C 受 l 值影响较小。

2.3 约束增大混凝土表面损伤的机理

2.3.1 约束对混凝土表面冰层最大拉应力的影响

“粘贴–剥落”理论提出冰层中累积拉应力按式(2)计算[19]。

$$\sigma(T)=\int_{T_1}^{T_2}B(T)\left[\Delta\alpha+A\sigma^N\exp(-Q/T)/q\right]\mathrm{d}T \quad (2)$$

$$\Delta\alpha=\alpha_i-\alpha_C \quad (3)$$

式中：$\sigma(T)$为温度为 T 时冰层中累积拉应力，MPa；T_1 为冰层累积应力计算温度下限，K；T_2 为冰层累积应力计算温度上限，K；$B(T)$为冰—混凝土体积平均双轴模量，MPa；$\Delta\alpha$为冰与混凝土的热膨胀系数之差，℃$^{-1}$；A、Q 均为经验常数[19, 24]，A=1.27×10^{13} MPa^{-3}·s^{-1}，Q=1.207×10^4 K；σ 为温度为 T_1 时冰层强度，MPa；N 为应力指数[19]，取 N=3；q 为降温速率，本试验条件为 1/360 K·s^{-1}；α_i 为冰的热膨胀系数，取 5×10^{-5} ℃$^{-1}$；α_C 为混凝土热膨胀系数，℃$^{-1}$。

$B(T)$与冰的体积分数$\omega(T)$的函数关系见式(4)，而$\omega(T)$与溶液温度T的函数关系见式(5)。

$$B(T)=E_{\mathrm{i}}\omega(T)/\left\{(1-\nu_{\mathrm{i}})\left[1-\omega(T)\right]\right\} \tag{4}$$

$$\omega(T)=k\mathrm{e}^{(-T/a)}+b \tag{5}$$

式中：E_{i}为冰的弹性模量[19]，取 10 GPa；$\omega(T)$为温度为 T时冰的体积分数，%；ν_{i}为冰的 Poisson 比[19]，取 0.33；k 为常数，3%NaCl 溶液为 4.45×10^{-47}；e 为自然常数，一般取 2.718 281 8；T 为某时刻试验槽中溶液温度，K；a 为常数，3%NaCl 溶液为 2.5；b 为常数，3%NaCl 溶液为 0.84。

分段积分计算混凝土试件表面冰层中累积拉应力：Ⅰ(–1.79～–10 ℃)和Ⅱ(–10～–20 ℃)，计算时混凝土热膨胀系数 α_{C} 按表 4 取值。溶液温度–1.79 ℃时，冰层应力 σ=0，式(2)简化为式(6)，积分得到–10 ℃时冰层中累积拉应力 σ(263)。计算第Ⅱ阶段(–10～–20 ℃)内的冰层拉应力时，–10 ℃时冰层应力取值为 σ=σ(263)，即–10 ℃时冰层初始应力取值为第Ⅰ阶段(–1.7～–10 ℃)结束时的应力值 σ(263)。再按式(2)积分得到–20 ℃时冰层累积拉应力 σ(253)。各组混凝土对应的冰层拉应力计算结果列于表 5。

$$\sigma(T)=\int_{271.21}^{263}B(T)\times\Delta\alpha\mathrm{d}T \tag{6}$$

表 5　不同温度段内冰层拉应力 $\sigma(T)$

Table 5　Tensile stress in the ice in different temperature range

Sample	Phase Ⅰ(–1.79 ℃ — –10 ℃)		Phase Ⅱ(–10 ℃— –20 ℃)	
	$\Delta\alpha/10^{-6}$ ℃$^{-1}$	σ(263)/MPa	$\Delta\alpha/10^{-6}$ ℃$^{-1}$	σ(253)/MPa
CF0	3.759	-0.578 1	3.266	2.73
TR1-28	4.281	-0.658 4	4.261	3.49
TR4-28	4.589	-0.705 7	4.450	3.52
TR8-28	4.661	-0.716 9	4.668	3.55
TR8-33	4.530	-0.717 9	4.514	3.54

表 5 中，Ⅰ段中 3 组膨胀约束不同的混凝土试件 TR1-28、TR4-28 和 TR8-28 的 $\Delta\alpha$ 比自由态混凝土 CF0 试件的 $\Delta\alpha$ 分别增加 14%、22%和 24%，3 组约束态混凝土表面冰层应力 σ(263)比自由态混凝土分别增加 13%、22%和 24%，且 σ(263)计算结果为负值。2 组收缩约束不同的混凝土试件，TR8-33 的 $\Delta\alpha$ 比 TR8-28 的 $\Delta\alpha$ 仅减小 3%，TR8-33 的 σ(263)比 TR8-28 的 σ(263)仅增加 0.1%。文献[19]中计算结果表明，–10 ℃前冰层无法获得拉应力，即当温度高于–10 ℃时，冰层应力理论值应该为 0，无累积拉应力，无法开裂。本实验中–10 ℃时冰层中应力计算结果为负值，表明冰层中此时为压应力，无拉应力存在，同时压应力很小，冰层生长基本结束。本实验计算结果更详细地说明了冰层在–10 ℃时所处应力状态，同时也证明了在–10 ℃前冰层中不存在拉应力，与文献[19]中的结果一致。

Ⅱ段中，3 组膨胀约束不同的混凝土试件 TR1-28、TR4-28 和 TR8-28 的 $\Delta\alpha$ 比自由态混凝土 CF0 试件的 $\Delta\alpha$ 分别增加 30%、36%和 43%，3 组约束态混凝土表面冰层应力 σ(253)比自由态混凝土分别增加 28%、29%和 30%，σ(253)计算结果为正。2 组收缩约束不同的混凝土试件，TR8-33 的 $\Delta\alpha$ 比 TR8-28 的 $\Delta\alpha$ 仅减小 3%，TR8-33 的 σ(253)比 TR8-28 的 σ(253)仅减小 0.3%。文献[19]中计算结果表明，当使用 3%NaCl 溶液时，–10 ℃后冰层应力迅速积累为拉应力并逐渐增加，超过冰层抗拉强度使冰层开裂。本实验中–10 ℃后冰层中应力计算结果为正值且均大于冰的抗拉强度(2.5 MPa)，表明冰层中为拉应力，冰层已能够开裂。本计算结果证明了 3%NaCl 溶液条件下冰层应力在–10 ℃后能迅速积累为拉应力，与文献[19]中的结果一致，且与自由态混凝土相比，约束态混凝土表面冰层拉应力更大。

综上，$\Delta\alpha$ 和 σ(253)均随膨胀约束应力增大而增大，与收缩约束应力关系较小。文献[19]中的计算结果仅考虑了不同浓度盐溶液中冰的体积分数变化对冰层应力的影响，本研究引入式(2)，在固定 3%NaCl 溶液的条件下，引入约束应力使混凝土表观热膨胀系数发生改变，计算结果证明了 $\Delta\alpha$ 是影响 σ(253)的原因，也说明了约束态混凝土表面冰层拉应力更大，冰层更容易开裂。

2.3.2　约束增加单面盐冻混凝土表面损伤的机理

当冰层中拉应力值大于冰层抗拉强度(约 2.5 MPa[19])，冰层出现裂纹和应力集中现象(图 7)。此时剩余 NaCl 溶液浓度升高，形成“盐水袋[19–20]”，不再结冰填充冰层裂纹，冰层裂纹将继续发展。这时可能会出现两种情况[18]：1) 裂纹沿冰—混凝土界面发展；2) 裂纹继续向混凝土层发展。由于混

凝土与冰层之间存在“互锁”效应[25]，即混凝土为亲水性材料，形成在混凝土表面上的冰与混凝土层间结合力远大于冰层中内应力，因此第 1 种情况几乎不会出现。

根据图 7 的应力分布，冰层裂纹尖端处的应力值可按照式(7)和式(8)计算[26]：

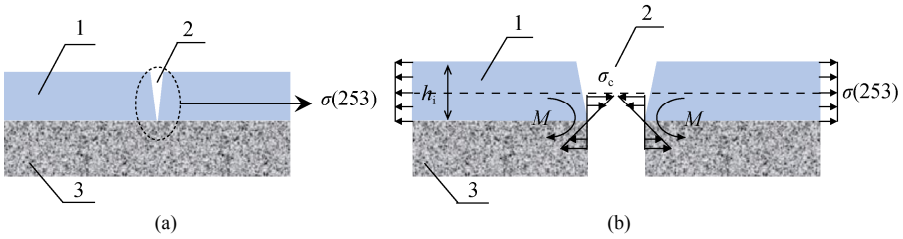


图 7　冰层中的裂纹及裂纹附近受力分析示意图

Fig. 7　Schematic drawing of ice crack and the stress analysis near the crack

$$\sigma_{\mathrm{c}}=\frac{6M}{B\times h_{\mathrm{i}}^2} \tag{7}$$

$$M=\sigma(253)\times B\times h_{\mathrm{i}}\times\frac{1}{2}h_{\mathrm{i}} \tag{8}$$

式中：σ_{c} 为裂纹尖端处冰层的拉应力值，MPa；M 为裂纹尖端截面弯矩，N·mm；B 为单位冰层宽度，mm；h_{i} 为冰层厚度，mm。

本实验中冰层厚度(混凝土测试面距离试验槽底部高度) h_{i}=5 mm，σ(253)取值见表 5，自由态混凝土与不同约束组合的约束态混凝土的冰–混凝土界面处冰层裂纹尖端应力值计算结果见表 6。

表 6　冰—混凝土界面处冰层裂纹尖端应力值

Table 6　Stress of ice crack tip at ice - concrete interface

Sample	σ(253)/MPa	σ_{c}/MPa
CF0	2.73	8.19
TR1-28	3.49	10.47
TR4-28	3.52	10.56
TR8-28	3.55	10.65
TR8-33	3.54	10.62

根据表 6 可知，σ_{c} 为正，表明 σ_{c} 为拉应力。不同混凝土的 σ_{c} 均大于本试验中混凝土极限抗拉强度 4.67 MPa (抗压强度的 1/10)，表面冰层裂纹足以破坏混凝土层，且约束态混凝土的 σ_{c} 明显大于自由态混凝土的 σ_{c}。3 组膨胀约束不同的混凝土试件 TR1-28、TR4-28 和 TR8-28 的 σ_{c} 比自由态混凝土 CF0 试件的 σ_{c} 分别增加 28%、29%和 30%；2 组收缩约束不同的混凝土试件，TR8-33 的 σ_{c} 比 TR8-28 的 σ_{c} 仅减小 0.3%。

综上所述，σ_{c} 随膨胀约束应力增大而增大，与收缩约束应力关系较小。约束态混凝土比自由态混凝土表面损伤大的根本原因是冰与约束态混凝土的热膨胀系数之差($\Delta\alpha$)更大，使 σ(253)增大，进而使 σ_{c} 增大，超过混凝土极限抗拉强度(4.67 MPa)，最终产生更严重的表面损伤。

3　结论

1) 约束态混凝土单面盐冻表面损伤程度大于自由态混凝土，其原因在于约束引起混凝土的热膨胀系数变化，使约束态混凝土的 σ(253)和 σ_{c} 增大，造成更严重的表面损伤，即冰与约束态混凝土温度变形之间的巨大差异是导致约束态混凝土表面损伤较大的原因。

2) 约束态混凝土单面盐冻表面剥落量随膨胀约束应力增大而增加，与收缩约束应力关系较小。

3) 单面盐冻混凝土的表观热膨胀系数随膨胀约束应力增大而减小，与收缩约束应力关系较小。

4) 混凝土表面冰层内拉应力随膨胀约束应力增大而增大，与收缩约束应力关系较小。

参考文献:

[1] SUN Wei, MU Ru, LUO Xin, et al. Effect of chloride salt, freeze-thaw cycling and externally applied load on the performance of the concrete[J]. Cem Concr Res, 2002, 32(12): 1859–1864.

[2] 李文婷, 孙伟, 蒋金洋. 疲劳荷载与环境因素耦合作用下混凝土损伤劣化研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2009. 37(12): 2142–2149.
LI Wenting, SUN Wei, JIANG Jinyang. J Chin Ceram Soc, 2009, 37(12): 2142–2149.

[3] 王阵地, 姚燕, 王玲. 冻融循环与氯盐侵蚀作用下混凝土变形和损伤分析[J]. 硅酸盐学报, 2012. 40(8): 1133–1138.
WANG Zhendi, YAO Yan, WANG Ling. J Chin Ceram Soc, 2012, 40(8): 1133–1138.

[4] 高志浩, 王玲, 赵霞, 等. 单面盐冻作用下混凝土约束应力测试装置设计及参数优选[J]. 混凝土, 2020(12): 26–30+34.
GAO Zhihao, WANG Ling, ZHAO Xia, et al. Concrete (in Chinese), 2020(12): 26–30+34.

[5] 高志浩. 约束应力调控及其对混凝土单面盐冻行为的影响[D]. 中国建筑材料科学研究总院, 2020.
GAO Zhihao. Control of Restraint Stress and Its Effect on Behavior of

Concrete under the Attack of Single-Side Freezing and Thawing (in Chinese, dissertation). Beijing: China Building Materials Academy, 2020.

[6] 徐亚丁. 约束状态下混凝土盐冻破坏行为和机理的研究[D]. 中国建筑材料科学研究总院, 2017.
XU Yading. Behavior and Mechanism of Damage Induced by Freeze-Thaw Cycles with Salt Solution of Restrained Concrete (in Chinese, dissertation). Beijing: China Building Materials Academy, 2017.

[7] 余红发, 孙伟, 张云升, 等. 在冻融或腐蚀环境下混凝土使用寿命预测方法Ⅰ——损伤演化方程与损伤失效模式[J]. 硅酸盐学报, 2008(S1): 128–135.
YU Hongfa, SUN Wei, ZHANG Yunsheng, et al. J Chin Ceram Soc, 2008(S1): 128–135.

[8] 龙广成, 杨振雄, 白朝能, 等. 荷载-冻融耦合作用下充填层自密实混凝土的耐久性及损伤模型[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(7): 855–864.
LONG Guangcheng, YANG Zhenxiong, BAI Chaoneng, et al. J Chin Ceram Soc, 2019, 47(7): 855–864.

[9] SETZER M J. Frostbelastungsmessung mit Behinderung der Verformungen eines porösen Prüfkörpers[P]. DE Patent, 14166123.1 2014.

[10] 徐亚丁, 王玲. 混凝土约束装置[P]. CN Patent, 201621165742.0. 2016.
XU Yading, WANG Ling. Concrete restraint device. CN Patent (in Chinese), 201621165742.0. 2016.

[11] 高志浩, 王玲. 混凝土约束应力和形变应力测量装置及测量方法[P]. CN Patent, 201910311601.7. 2019.
GAO Zhihao, WANG Ling. Concrete restraint stress and deformation stress measuring device and measuring method. CN Patent (in Chinese), 201910311601.7. 2019.

[12] 徐亚丁, 王玲, 王振地. 混凝土冻融/盐冻破坏现象、机理和试验方法[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(2): 491–514.
XU Yading, WANG Ling, WANG Zhendi. Bull Chin Ceram Soc (in Chinese), 2017, 36(2): 491–514.

[13] XU Yading, WANG Ling, ZHAO Xia. Analysis of Internal Frost Damage of Restrained Concrete[C]//Recent Advances in Concrete Technology and Sustainability Issues, Beijing, China, 2018.

[14] POWERS T C, HELMUTH R A. Theory of volume changes in hardened Portland cement-paste during freezing[C]//Proceedings of the 32nd Annual Meeting on the Highway Research Board. Washington, DC, 1953, 32: 285–297.

[15] 杨全兵. 混凝土盐冻破坏机理(Ⅰ)——毛细管饱水度和结冰压[J]. 建筑材料学报, 2007(5): 522–527.
YANG Quanbing. J Build Mater (in Chinese), 2007(5): 522–527.

[16] 杨全兵. 混凝土盐冻破坏机理(Ⅱ): 冻融饱水度和结冰压[J]. 建筑材料学报, 2012(6): 741–746.
YANG Quanbing. J Build Mater (in Chinese), 2012(6): 741–746.

[17] 王发洲, 张梓鑫, 李明, 等. 盐溶液浓度差对混凝土单面抗冻性的影响[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(1): 138–142.
WANG Fazhou, ZHANg Zixin, MING Li, et al. J Build Mater (in Chinese), 2014, 17(1): 138–142.

[18] VALENZA J J, SCHERER G W. Mechanism for salt scaling[J]. J Am Ceram Soc, 2006, 89(4): 1161–1179.

[19] VALENZA J J, SCHERER G W. Mechanism for salt scaling of a cementitious surface[J]. Mater Struct , 2007, 40(3): 259–268.

[20] VALENZA J J, SCHERER G W. A review of salt scaling: II. Mechanisms[J]. Cem Concr Res, 2007, 37(7): 1022–1034.

[21] HAYNES W M, LIDE D R, BRUNO T J. CRC Handbook of Chemistry and Physics, 95th Edition [M]. Section 5 Thermochemistry, Electrochemistry, and Solution Chemistry. 2015: 5–142.

[22] WEEKS W F. Tensile strength of NaCl ice[J]. J Glaciol, 1962, 4(31): 25–52.

[23] WANG Zhendi, YAO Yan, WANG Ling. Research on the apparent thermal expansion coefficient of concrete subject to freeze-thaw cycles and chloride salt attack[J]. Adv Mater Res, 2012, 446-449: 3304–3310.

[24] BARNES P, DAVID T, WALKER J C F. The Friction and Creep of Polycrystalline Ice[C]//Proceedings of the Royal Society, Great Britain: The Royal Society Publishing, 1971: 127–155.

[25] RARATY L E, TABOR D. The Adhesion and Strength Properties of Ice[C]//Proceedings of the Royal Society, London: The Royal Society Publishing, 1958: 184–201.

[26] TADA Hiroshi, PARIS P C, IRWIN G R. The Stress Analysis of Cracks Handbook [M]. 3rd.New York: ASME Press, 2000: 82–164.