

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.02.012

胡少伟, 王阳. 不同冻融方式下混凝土双K断裂韧度对比试验[J]. 水利水运工程学报, 2018(2): 90-96. (HU Shaowei, WANG Yang. Experimental study on double-K fracture toughness of concrete in different freezing and thawing modes[J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(2): 90-96. (in Chinese))

不同冻融方式下混凝土双K断裂韧度对比试验

胡少伟¹, 王 阳^{1,2}

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为了研究不同冻融方式对混凝土双K断裂韧度带来的不同影响, 设计了5组共计15个试件, 分别经历干燥、水浸泡、水冻融、盐浸泡、盐冻融作用20 d后进行三点弯曲梁试验。测定了试件断裂过程中的荷载、张口位移、裂缝尖端应变等参数的特征值和全过程曲线, 基于双K断裂理论分别计算了各组环境下混凝土的有效裂缝长度、起裂荷载、失稳荷载等断裂参数。结果表明: 不同冻融方式对混凝土造成的影响具有一定的相似性, 水冻融与盐冻融均会对混凝土的弹性模量造成损失, 使其断裂力学性能下降, 但会提高混凝土韧性。在损伤程度和损伤后混凝土受力表现上不同冻融方式有显著区别。水冻融后混凝土受荷时更易开裂, 但水冻融环境对混凝土抵抗裂缝发展能力的影响不明显。盐冻融后混凝土抵抗裂缝发生以及发展的能力同时降低, 但混凝土受力时裂缝的发生会相对推迟。

关 键 词: 混凝土; 盐冻融; 水冻融; 双K断裂参数

中图分类号: TU528.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2018)02-0090-07

混凝土冻融破坏广泛存在, 其破坏程度远比预想的要迅速、严重。众多学者对混凝土冻融破坏开展了大量试验研究, 但绝大多数试验均基于水冻融环境, 而由于含氯融雪剂的使用, 真实环境中的冻融破坏往往是以盐冻融这种形式存在的。水冻融与盐冻融在机理上具有较大差异, 对混凝土造成的损伤也有所不同。

一般认为吸水饱和的混凝土在水冻融过程中, 遭受的冻胀破坏应力主要由两部分组成^[1]: 一方面是当混凝土中毛细孔内的水达到冰点, 结冰体积膨胀, 由于毛细孔壁会抑制膨胀的过程, 从而导致膨胀压的作用; 另一个方面是混凝土孔隙内有一种凝胶孔, 孔内水在相当低的温度都很难结冰, 该孔内水和毛细孔内的冰之间在混凝土的孔径结构内形成通道, 相互作用产生渗透压力。在混凝土遭受水冻融作用时, 膨胀力和渗透压力共同对混凝土内部的孔隙结构造成损伤, 而由于外界反复不断的水冻融循环作用, 使混凝土受到的损伤也不断地扩展叠加, 由最初细小的裂纹形状发展成了贯通的清晰可见的裂缝, 最终导致无法承受荷载力。

相比于水冻融, 盐冻融破坏更加剧烈, 其表现上与水冻融破坏最大的差异在于, 伴随着冻融循环的进行, 试件表面会出现砂浆乃至细骨料的剥蚀脱落, 并随着循环次数的增加不断加剧。盐冻融的破坏机理主要为^[2-3]: (1) 在冻胀作用的基础上, 由于盐的存在, 混凝土内产生的渗透压增大, 饱水度提高, 结冰压增大, 导致更为严重的冻胀破坏, 这是盐和冻共同作用使破坏加剧的主要机理; (2) 由于盐产生的过冷水处在不稳定状态, 使得其最终在毛细孔中结冰时增加破坏力; (3) 由于盐在混凝土表面形成的浓度梯度, 使受冻时因分层结冰产生应力差; (4) 海盐中存在卤水成分, 接触混凝土后会不断在其孔隙内形成硫酸盐结晶, 加剧孔隙的破坏等。

这导致现有水冻融试验成果在指导实际工程时存在缺陷和不足。因此, 探究盐冻融下混凝土的断裂力

收稿日期: 2017-07-30

基金项目: 国家重大科研仪器研制项目(51527811); 国家杰出青年基金项目(51325904)

作者简介: 胡少伟(1969—), 男, 河南开封人, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事工程结构与材料研究。

E-mail: hushaowei@nhri.cn

学性能,分析水冻融与盐冻融环境对混凝土断裂性能影响的异同,为已有的水冻融下混凝土各项力学性能的研究提供更接近于真实环境的修正,得到混凝土自然环境下的冻融破坏规律,将为混凝土抗冻融破坏研究提供新的思路 and 方向,对在此环境下工作的混凝土服役性能评估和断裂分析具有重要的意义。

自 Kaplan^[4] 提出 Griffith 理论以来,国内外学者不断通过混凝土的断裂试验来测定混凝土断裂参数,以研究混凝土裂缝扩展过程以及缝端附近区域的物理特性与力学行为^[5]。徐世烺等^[6] 观察了混凝土材料断裂的全过程,在前人的基础上提出了双 K(起裂韧度和失稳韧度)断裂模型并给出了实用的简化公式,很好地诠释了混凝土断裂过程的机理。随后大量学者^[7-9] 通过三点弯曲梁和楔入劈拉试件验证了其理论在常温条件下的合理性。目前,我国制定的《水工混凝土断裂试验规程》^[10] 已将混凝土双 K 断裂参数作为材料基本断裂性能指标。长久以来,学者们在断裂试验方法、尺寸效应、断裂韧度和断裂能的计算以及材料改性方面对常温条件下混凝土断裂性能做了大量研究。

在常温混凝土断裂性能研究的基础上,众多学者对水冻融及盐冻融后混凝土的断裂性能也展开了广泛的研究^[11-12],但多集中于水冻融后材料断裂能方面^[13],对水冻融后断裂韧度的研究开展较少^[14],对盐冻融后断裂韧度的研究还很少见。

本文结合国内外研究成果,基于双 K 断裂准则,采用非标准三点弯曲梁试件,通过模拟水冻融与盐冻融的环境作用,得到不同冻融方式下混凝土断裂性能的变化情况,对比研究水冻融与盐冻融对混凝土双 K 断裂韧度的影响。

1 试验原材料与方法

1.1 试验材料

混凝土试件组成材料为:生活饮用水,P·O 42.5 级水泥,5~25 mm 级碎石,天然河砂。混凝土配合比为水泥:水:砂:石=1:0.410:1.045:2.121。混凝土立方体抗压强度均值为 41.5 MPa,标准差为 3.33 MPa。所有试件 1 次浇筑完成,每组 3 个试件。浇筑 1 d 后脱模,常温养护 28 d。试件预制裂缝采用厚度为 3 mm,带有 30°尖角的钢板预埋生成。

试验共设计 5 组 15 根三点弯曲混凝土梁,试件长为 500 mm,试件截面宽为 100 mm,截面高为 100 mm,初始设计缝高比为 0.4,对应的初始裂缝长度 a_0 为 40 mm,混凝土设计强度等级为 C40。为研究水冻融与盐冻融对混凝土三点弯曲梁冻融后双 K 断裂韧度影响的差异并设置对照组控制变量,分别将各组梁置于常温干燥、常温纯水浸泡、常温盐水浸泡、纯水冻融、盐水冻融条件下进行处理,试件编号见表 1。

表 1 试件编号
Tab. 1 Specimen number

条件	盐冻融	水冻融	干燥	盐浸泡	水浸泡
编号	sf-10-0.4-1	wf-10-0.4-1	d-10-0.4-1	s-10-0.4-1	w-10-0.4-1
	sf-10-0.4-2	wf-10-0.4-2	d-10-0.4-2	s-10-0.4-2	w-10-0.4-2
	sf-10-0.4-3	wf-10-0.4-3	d-10-0.4-3	s-10-0.4-3	w-10-0.4-3

注:各组试件缝高比为 0.4,循环周期为 10 次(20 d),每组设置 3 个试件。

1.2 预处理

盐浸泡组及盐冻融组放入盛有质量分数为 4% 的海盐溶液^[2-3] 中浸泡 4 d^[15],水浸泡组及水冻融组放入生活饮用水中浸泡 4 d,干燥组在室温干燥环境下放置 4 d。

1.3 静置与冻融

预处理后,将水冻融组、盐冻融组试件连同浸泡盒一起放入低温试验箱中进行冻融循环,水浸泡组、盐浸泡组继续浸泡,干燥组继续置于干燥环境中。冻融 1 次循环周期为 48 h,冷冻时试验箱内温度为-30 ℃,循环 10 个周期。降温过程在低温试验箱中完成,升温过程在试验室室温环境下进行。

1.4 后处理及加载、测试方案

待水冻融与盐冻融组冻融循环结束后,将所有试件置于试验室内干燥 10 d。试验均在 5 000 kN 压力机上进行,恒定位移加载,速率为 0.05 mm/s,加载过程中通过预先粘贴的应变片和荷载传感器测试测点应变及荷载,并采用夹式引伸计测试裂缝张口位移 S_{CMOD} 。

引伸计及应变片布置方式如图 1 所示,荷载及各测点的应变采用 DH5902 型数据采集分析系统进行采集,夹式引伸计标距 12 mm,变形测量范围 +4 ~ -1.0 mm。在每个试件预制裂缝中心延长线方向布置 1 个电阻应变片,并在预制裂缝尖端两侧粘贴一对电阻应变片,应变片标距 5 cm;通过在预制裂缝口两侧粘贴四棱柱钢片,将夹式引伸计安装在钢片刀口位置,直接测量出 S_{CMOD} 值。

试验中主要采集数据包括:荷载 P ,混凝土应变,裂缝张口位移 S_{CMOD} 。

2 试验结果与分析

2.1 起裂点判断

随着荷载的增加,预制裂缝尖端两侧电阻应变片的应变值逐渐增加,且基本上呈线性变化;一段时间后,由于裂缝尖端混凝土的开裂,初始裂缝尖端两侧的拉应变减小,甚至此处出现混凝土受压,故荷载-应变关系曲线转折点对应的荷载值即为试件的起裂荷载,如图 2 所示。

2.2 双 K 断裂准则及参数计算

混凝土中裂缝的扩展可以分为 3 个不同的阶段:裂缝初始起裂、稳定扩展、失稳破坏。相应的双 K 断裂准则定义为:当 $K < K_{\text{IC}}^{\text{ini}}$ 时,裂缝不扩展;当 $K = K_{\text{IC}}^{\text{ini}}$ 时,裂缝开始稳定扩展;当 $K_{\text{IC}}^{\text{ini}} < K < K_{\text{IC}}^{\text{un}}$ 时,裂缝处于稳定扩展阶段;当 $K = K_{\text{IC}}^{\text{un}}$ 时,裂缝开始失稳扩展;当 K 大于失稳初度时,裂缝处于失稳扩展阶段。

其中, K 为试件断裂初度; $K_{\text{IC}}^{\text{ini}}$ 为混凝土起裂初度; $K_{\text{IC}}^{\text{un}}$ 为混凝土失稳初度。弹性模量按式(1)计算:

$$E = \frac{1}{tc_i} \left[3.70 + 23.60 \tan^2 \left(\frac{\pi}{2} \frac{a_0 + h_0}{h + h_0} \right) \right] \quad (1)$$

式中: a_0 取 0.04 m; t 为试件截面宽度,本文取 10 cm; h_0 为夹式引伸计刀口薄钢板的厚度,本文取 10 mm; c_i 由试件 $S_{\text{CMOD}}-P$ 曲线的上升段直线上任一点的 S_{CMOD_i} 和 P_i 计算, $c_i = S_{\text{CMOD}_i} / P_i$ 。

根据线弹性渐进叠加假定,非线性的断裂过程可简化为一系列的线性叠加过程。当外荷载达到最大值 P_{max} 时,裂缝张开口位移 δ 也达到最大,裂缝长度从预制长度 a_0 发展到临界有效裂缝 a_c 。从实测的 $P-\delta$ 曲线上读取 P_{max} 和临界裂缝张开口位移 δ_c ,可得如下临界有效裂缝长度:

$$a_c = \frac{2}{\pi} (h + h_0) \arctan \left(\frac{tEV_c}{32.6P_{\text{max}}} - 0.1135 \right)^{\frac{1}{2}} - h \quad (2)$$

式中: V_c 为裂缝口张开位移临界值; E 为计算弹性模量。

根据线弹性渐进叠加假定,获得 P_{max} 和 a_c 后失稳初度按式(3)计算:

$$K_{\text{IC}}^{\text{un}} = \frac{P_{\text{max}} \times 10^{-3}}{th^2} f(\alpha) \quad (3)$$

式中: $K_{\text{IC}}^{\text{un}}$ 为失稳初度, $f(\alpha)$ 具体参见文献[6]。

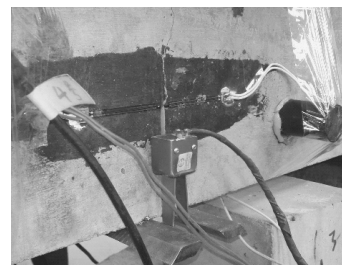


图 1 引伸计及应变片布置

Fig. 1 Extensometer and strain gauge layout

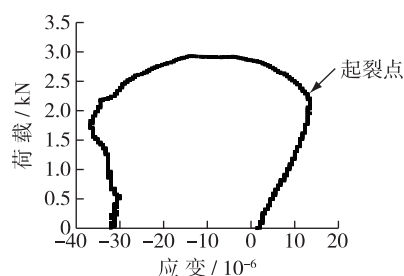


图 2 荷载-应变曲线确定起裂点

Fig. 2 Force-strain curve to determine the starting point

起裂韧度按式(4)计算:

$$K_{IC}^{ini} = \frac{P_{ini} \times 10^{-3}}{th^2} f(\alpha)$$

(4)

式中: K_{IC}^{ini} 为起裂韧度。

需要注意的是,由于试件尺寸为非标准尺寸,需按式(5)换算成标准试件的断裂韧度^[16]:

$$K_{IC}^{标准} = \left(\frac{V_{非标准}}{V_{标准}} \right)^{1/2} \left(\frac{h_{标准}}{h_{非标准}} \right) K_{IC}^{非标准}$$

(5)

式中: α 为 Weibull 参数,混凝土一般取 7~13,这里取中间值 10。

根据以上各式,计算所得断裂参数见表 2。

表 2 混凝土断裂参数计算结果
Tab. 2 Calculation results of the concrete fracture parameters

试件编号	弹性模量/ Gpa	起裂荷载/ kN	失稳荷载/ kN	起裂荷载/ 失稳荷载	临界裂缝 长度/m	起裂韧度	失稳韧度	起裂韧度/ 失稳韧度
d-10-04-1	25.1	1.211	3.196	0.379	0.047 2	0.672	1.212	0.554
d-10-04-2	27.2	1.049	3.084	0.340	0.054 6	0.745	1.320	0.564
d-10-04-3	26.2	1.127	2.647	0.426	0.047 8	0.758	1.294	0.586
平均值	26.2	1.129	2.976	0.382	0.049 9	0.725	1.275	0.568
w-10-04-1	32.9	2.194	3.324	0.660	0.040 1	0.912	1.290	0.707
w-10-04-2	34.3	2.104	3.518	0.598	0.042 1	0.895	1.313	0.682
w-10-04-3	33.0	2.258	3.642	0.620	0.041 1	0.880	1.351	0.651
平均值	33.4	2.185	3.495	0.626	0.041 1	0.896	1.318	0.680
s-10-04-1	33.5	2.114	3.682	0.574	0.042 3	0.934	1.376	0.679
s-10-04-2	33.5	2.343	3.582	0.654	0.042 0	0.901	1.259	0.716
s-10-04-3	32.2	2.341	3.801	0.616	0.041 7	0.798	1.350	0.691
平均值	33.1	2.266	3.688	0.615	0.042 0	0.878	1.328	0.695
wf-10-04-1	31.0	0.834	2.684	0.311	0.050 5	0.267	1.128	0.237
wf-10-04-2	32.1	1.224	3.264	0.375	0.053 1	0.345	1.314	0.263
wf-10-04-3	32.7	1.394	3.213	0.434	0.055 3	0.437	1.413	0.309
平均值	31.9	1.151	3.054	0.374	0.053 0	0.350	1.285	0.270
sf-10-04-1	24.7	2.012	2.714	0.741	0.051 3	0.624	1.171	0.533
sf-10-04-2	24.0	2.155	2.924	0.737	0.052 6	0.667	1.316	0.507
sf-10-04-3	25.3	1.837	2.924	0.628	0.046 8	0.571	1.095	0.521
平均值	24.7	2.001	2.854	0.702	0.050 2	0.621	1.194	0.520

2.3 结果分析

2.3.1 弹性模量 如图 3 所示,相对于干燥放置,浸泡于纯水或者盐溶液的试件弹性模量有明显增长,且增幅相当,推测原因为混凝土即使在 28 d 养护结束后,各项性能仍有一定的增长潜力,浸泡于水环境使得这部分潜力得以发挥。

同时可以发现,冻融环境会降低混凝土弹性模量。水冻融下弹性模量相比于水浸泡组稍有减小,仍能达到 95.5%,这也说明 10 次水环境冻融循环仍未对混凝土的弹性模量造成明显影响;而盐冻融后的弹性模量仅有盐浸泡组的 74.6%,说明混凝土弹性模量对于盐冻融环境非常敏感,10 次盐环境冻融循环已对混凝土造成显著损伤。

2.3.2 起裂荷载与失稳荷载 图 4 为各组试件起裂荷载与失稳荷载对比,可以发现浸泡于纯水及盐水的试件相对于干燥组其 P_{ini} 与 P_{max} 均有一定程度的提高, P_{ini}/P_{max} 增大,验证了水环境会对试件提供加强养护的

推测。

水冻融组 P_{ini} 为对应浸泡组的 52.7%, P_{max} 为对应浸泡组的 87.4%, 同时, P_{ini}/P_{max} 也大幅降低, 仅有水浸泡组的 59.7%。说明试件经历水冻融后断裂性能显著降低, 同时水冻融造成混凝土中微裂纹起裂、扩展, 使得混凝土更早开裂。

盐冻融组 P_{ini} 为对应浸泡组的 88.3%, P_{max} 为对应浸泡组的 77.4%, P_{ini}/P_{max} 有小幅增长, 说明同水冻融相似, 试件经历盐冻融后断裂性能降低, 但加载时裂缝的发生却相对推迟, 推测是由于盐冻融作用下混凝土受到的胀裂作用更为明显, 使得混凝土中缺陷提前开裂至破坏, 表层受损混凝土逐渐剥蚀脱落, 推迟了加载时裂缝的发生。

2.3.3 有效裂缝长度 图 5 为各组试件的有效裂缝长度 a_c 。有效裂缝长度越长, 所经历的扩展距离越大, 相应的韧性水平越高。

水浸泡组与盐浸泡组其 a_c 较干燥组有所降低, 分别为其 82.4% 和 84.2%, 说明伴随水环境的加强养护作用, 浸泡组试件相对于干燥组强度提高, 因而韧性有所降低。

而由于经历冻融后混凝土中原有缺陷提前被破坏, 无论是水冻融还是盐冻融, 其 a_c 相对于浸泡组试件都有所增加, 达到各自浸泡组的 129.0% 和 119.5%, 说明冻融后混凝土韧性增强, 水冻融环境与盐冻融环境对韧性的提高程度基本相当。

2.3.4 起裂韧度与失稳韧度 图 6 为各组试件的起裂韧度与失稳韧度。可以发现起裂韧度与失稳韧度的总体趋势和起裂荷载与失稳荷载的变化相当。浸泡于纯水及盐水的试件相对于干燥组其起裂韧度与失稳韧度均有所提高, 说明水环境加强养护对于混凝土的增强作用在双 K 韧度上也有所表现。

水冻融组相比于水浸泡组, 伴随 P_{ini} 的减小, 起裂韧度明显降低, 为水浸泡组的 39.1%, 而失稳韧度仅小幅减小, 为水浸泡组的 97.5%, 说明经历 10 个循环周期的水冻融后混凝土断裂性能降低主要表现为: 由于混凝土中微裂纹受冻后开裂、扩展而带来的混凝土抵抗裂缝发生的能力明显降低。

盐冻融组相比于盐浸泡组, 起裂韧度与失稳韧度均有相当程度的减小, 分别为盐浸泡组对应的 70.7% 和 89.9%。可以发现试件经历盐冻融后, 内部缺陷不断开展, 弹性模量大折减, 导致起裂韧度与失稳韧度同时降低, 同时表层混凝土由于产生了严重的冻伤而提前剥蚀、脱落, 一定程度上相对推迟了裂缝的发生。结果

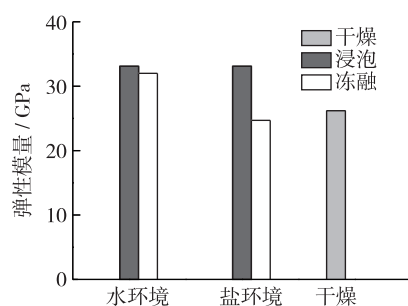


图 3 各组试件的混凝土平均计算弹性模量

Fig. 3 Average calculated elastic modulus of specimens in each group of specimens

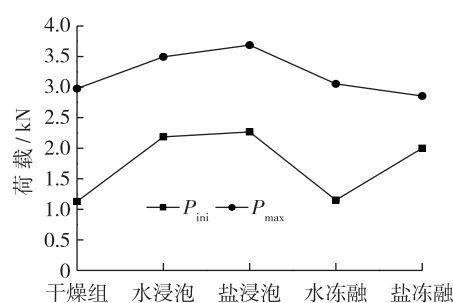


图 4 起裂荷载与失稳荷载

Fig. 4 Cracked load and unstressed load

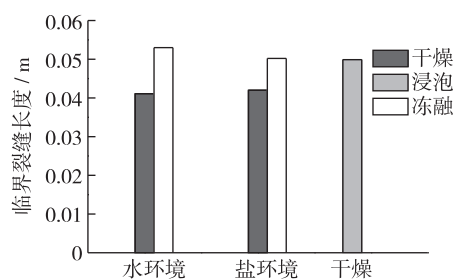


图 5 试件有效裂缝长度

Fig. 5 Specimen effective crack length

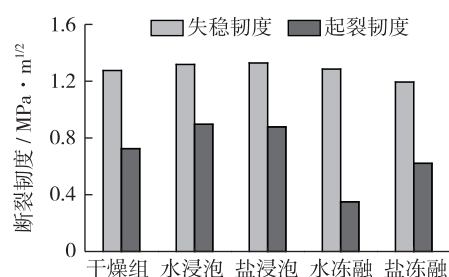


图 6 起裂韧度与失稳韧度

Fig. 6 Fracture toughness and failure toughness

表现为起裂韧度与失稳韧度同时降低,但相比于失稳韧度,起裂韧度的减幅度较小。说明经历10个循环周期的盐冻融后混凝土断裂性能降低主要表现为:一方面弹性模量的大幅折减而带来的混凝土抵抗裂缝发生以及发展的能力同时降低;另一方面表层受损混凝土脱落而使得试件表层缺陷减少,造成受力时裂缝的发生相对推迟。

3 结 语

依据双K断裂准则,对比常温浸泡下的试件,分析经历不同冻融方式后混凝土断裂参数的变化情况,研究了水冻融及盐冻融环境对混凝土双K断裂性能的影响,结果表明:

不同冻融方式对混凝土造成的影响具有一定的相似性,但在损伤程度和损伤后混凝土受力表现上有显著区别。

水冻融对混凝土造成的损伤主要表现在:混凝土中微裂纹受冻后开裂、扩展而导致混凝土抵抗裂缝发生的能力明显降低,受荷后起裂快。结果表现为 P_{ini} 降至浸泡组的52.7%, P_{ini}/P_{max} 降为59.7%,起裂韧度仅达到39.1%。而水冻融后混凝土弹模的损伤较轻微,10次循环后弹模仍能达到浸泡组的95.5%,失稳韧度变化很小,由此可知水冻融环境对混凝土抵抗裂缝发展的能力影响较不明显。

盐冻融对混凝土造成的损伤主要表现在:一方面,盐冻融后混凝土抵抗裂缝发生以及发展的能力同时降低。混凝土总体断裂性能对盐冻融环境非常敏感,盐冻融后混凝土弹性模量折减为盐浸泡组的74.6%,起裂韧度与失稳韧度分别降为70.7%和89.9%;另一方面,表层受损混凝土脱落而使得试件表层缺陷减少,造成受力时裂缝的发生相对推迟,表现为 P_{ini} 小幅下降为浸泡组的88.3%, P_{ini}/P_{max} 有小幅增长。

参 考 文 献:

- [1] PIGEON M, MARCHAND J, PLEAU R. Frost resistance concrete[J]. Construction and Building Materials, 1996, 10(5): 339-348.
- [2] 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, 10(5): 522-527. (YANG Quanbing. Mechanisms of deicer-frost scaling of concrete(I)—Capillary-uptake degree of saturation and ice-formation pressure [J]. Journal of Building Materials, 2007, 10(5): 522-527. (in Chinese))
- [3] 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, 15(6): 741-746. (YANG Quanbing. One of mechanisms on the deicer-frost scaling of concrete(II): Degree of saturation and ice-formation pressure during freezing-thawing cycles[J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(6): 741-746. (in Chinese))
- [4] KAPLAN M F. Crack propagation and the fracture of concrete[J]. 1961.
- [5] 胡少伟, 陆俊, 范向前. 混凝土损伤断裂性能试验研究进展[J]. 水利学报, 2014, 45(增刊1): 10-18. (HU Shaowei, LU Jun, FAN Xiangqian. Summary of experimental study on fracture properties of concrete[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(Suppl1): 10-18. (in Chinese))
- [6] 徐世烺, 赵国藩. 混凝土结构裂缝扩展的双K断裂准则[J]. 土木工程学报, 1992, 25(2): 32-38. (XU Shilang, ZHAO Guofan. A double-K fracture criterion for the crack propagation in concrete structures[J]. Journal of Civil Engineering, 1992, 25(2): 32-38. (in Chinese))
- [7] FAN Xiangqian, HU Shaowei, LU Jun. Effects of various reinforcement ratio on fracture toughness of reinforced concrete for three-points bending beams[J]. Water Resources and Power, 2013.
- [8] 胡少伟, 安康. 不同尺寸混凝土三点弯曲梁试件断裂过程试验研究[J]. 水利水电技术, 2015, 46(6): 120-125. (HU Shaowei, AN Kang. Experimental study on fracture process of various size specimens of three-point bending concrete beam[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2015, 46(6): 120-125. (in Chinese))
- [9] 范向前, 胡少伟, 陆俊. 非标准混凝土三点弯曲梁双K断裂韧度试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(10): 152-157. (FAN Xiangqian, HU Shaowei, LU Jun. Experimental research on double-K fracture toughness of non-standard three point bending concrete beam[J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(10): 152-157. (in Chinese))
- [10] DL/T 5332—2005 水工混凝土断裂试验规程[S]. (DL/T 5332—2005 Hydraulic concrete fracture test procedures[S]. (in

- Chinese))
- [11] DONG W, SHEN X D, XUE H J, et al. Research on the freeze-thaw cyclic test and damage model of Aeolian sand lightweight aggregate concrete[J]. *Construction & Building Materials*, 2016, 123: 792-799.
- [12] 宁作君, 巴恒静, 杨英姿. 冻融环境下混凝土的断裂损伤试验研究[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2009, 30(1): 27-32. (NING Zuojun, BA Hengjing, YANG Yingzi. Experimental study of fracture damage in concrete subjected to freeze-thaw cycles [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2009, 30(1): 27-32. (in Chinese))
- [13] 于孝民, 任青文. 冻融循环作用下普通混凝土断裂能试验[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2010, 38(1): 80-82. (YU Xiaomin, REN Qingwen. Fracture release energy for ordinary concrete with freeze-thaw cycles[J]. *Journal of Hohai University (Natural Science)*, 2010, 38(1): 80-82. (in Chinese))
- [14] 高丹盈, 程红强. 冻融循环作用下钢纤维混凝土 II 型断裂性能[J]. *水利学报*, 2007, 38(8): 998-1002. (GAO Danying, CHENG Hongqiang. Mode II fracture properties of steel fiber reinforced concrete subjected to cyclic freezing and thawing[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(8): 998-1002. (in Chinese))
- [15] TIAN J, WANG W, DU Y. Damage behaviors of self-compacting concrete and prediction model under coupling effect of salt freeze-thaw and flexural load[J]. *Construction & Building Materials*, 2016, 119: 241-250.
- [16] 胡少伟, 谢建锋. 非标准混凝土楔入劈拉试件断裂参数试验研究与尺寸效应分析[J]. *水电能源科学*, 2015(5): 105-108. (HU Shaowei, XIE Jianfeng. Experimental study on fracture parameters and size effect analysis of splitting specimen in nonstandard concrete[J]. *International Journal Hydroelectric Energy*, 2015(5): 105-108. (in Chinese))

Experimental study on double-K fracture toughness of concrete in different freezing and thawing modes

HU Shaowei¹, WANG Yang^{1, 2}

(1. *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 2. *College of Civil Engineering and Transportation, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: In order to study the effects of different freezing and thawing methods on the fracture toughness of concrete with double-K, five groups of 15 specimens, respectively subjected to drying, water immersion, freezing and thawing, salt immersion and salt freezing and thawing for 20 days, were studied in the three point bend test. The eigenvalues and the whole process curve of the load, the displacement of the mouth and the strain at the tip of the crack were measured. Based on the double-K fracture theory, the effective crack length, the crack initiation load, the instability load and other fracture parameters were calculated. The results show that the influence of different freezing and thawing methods on the concrete has some similarity. Not only the concrete of water freezing and thawing but also the concrete of salt freezing and thawing can damage the elastic modulus of the concrete, decrease the mechanical properties of the concrete and increase the toughness of the concrete. However, there is a significant difference in the way of freezing and thawing between the degree of damage and the concrete after damage. Water freezing and thawing damage to the concrete is mainly manifested in the fact that the concrete is more easily cracked when subjected to water freezing and thawing, but the effect of water freezing and thawing environment on the development of concrete in resistance to cracking is insignificant. Salt freeze-thaw damage to concrete is mainly manifested in the salt freeze-thaw resistance to concrete cracks and the development of the ability to reduce at the same time, but the concrete cracks occurrence will be relatively postponed.

Key words: concrete; salt-freeze-thaw; water-freeze-thaw; double-K fracture parameters