

DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2010.01.017

冻融循环作用下普通混凝土断裂能试验

于孝民^{1,2}, 任青文¹

(1. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 徐州水利局规划计划处, 江苏 徐州 221002)

摘要: 为了研究冻融循环对普通混凝土断裂性能的影响, 依据相关规范进行混凝土快速冻融循环试验, 对 4 组 C20 普通混凝土进行了冻融次数分别为 0 次、10 次、20 次和 30 次的试件的断裂能测试。试验结果表明, 随着冻融循环次数的增加, 混凝土断裂能呈逐渐下降趋势, 断裂能损失与相对动弹模损失率的变化规律基本一致。这说明断裂能也可作为衡量混凝土冻融损伤的一个重要指标。

关键词: 冻融破坏; 断裂能; 混凝土

中图分类号: TU528.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-1980(2010)01-0080-03

混凝土抗冻耐久性是混凝土耐久性研究的重要内容之一。近年来, 围绕混凝土冻融循环的试验研究主要集中于冻融破坏机理、影响因素、改善措施以及抗冻耐久性寿命预测模型等方面^[1-2]。宋玉普等^[3-8]开展了冻融环境下混凝土静力学特性方面的试验研究, 建立了相应的破坏准则以及损伤本构方程, 为研究冻融混凝土力学特性奠定了一定的基础。研究表明, 混凝土冻融破坏的实质是: 在冻融循环下, 其疲劳损伤累积扩展导致混凝土体积膨胀、结构松散而发生开裂破坏的过程。断裂能对冻融循环产生的裂缝较为敏感, 因为能量的耗散包含了强度和变形 2 个方面的信息, 能够较好表征混凝土冻融损伤的状态, 是衡量混凝土抗裂特性的一个重要指标。目前, 采用断裂能研究冻融作用后混凝土的断裂行为和断裂特征的较少^[9-10], 对冻融环境下普通混凝土断裂能试验研究就更少。本文通过对承受若干次冻融循环的中低标号 C20 普通混凝土进行的断裂能测试, 研究了其断裂能随冻融循环次数的变化规律。

1 试验设计

1.1 材料及配合比

混凝土原材料: 水泥 P·O 32.5; 中砂, 细度模数 2.6; 连续级配碎石; 混凝土坍落度(70 ± 10)mm。配制的 C20 混凝土配合比: 水泥 342 kg/m³, 砂 638 kg/m³, 石 1178 kg/m³, 水 188 kg/m³, 水灰比 0.55, 坍落度 65 mm, 含气量 1.3%。C20 混凝土主要力学参数——抗压强度 33.6 MPa。

1.2 试件设计

对 C20 混凝土进行 0 次、10 次、20 次和 30 次的冻融试验, 测量不同冻融循环次数下的混凝土断裂能。为此, 试验按照 SL211—98《水工建筑物抗冰冻设计规范》和 SL352—2006《水工混凝土试验规程》, 需制作 4 组(每组 3 块)100 mm × 100 mm × 400 mm 试件和 1 组 150 mm × 150 mm × 150 mm 立方体试件。立方体试件用来测定抗压强度, 而测定断裂能的试件则要在试件中间底部预制 40 mm 深裂缝, 缝宽 1 ~ 2 mm。为预制裂缝, 采用木模在中间部位预先嵌入 1.5 mm 薄钢片, 待混凝土初凝时及时拔出预置钢片。试件拆模后, 立即在标准养护室中养护, 达到试验龄期的前 4 d, 将试件放在(20 ± 3)℃的水中浸泡 28 d 养护后进行冻融试验。

1.3 试验设备

冻融试验在 DDR-2 型混凝土快速冻融试验机上(图 1)进行。该设备主要性能: 试件中心温度(-18 ± 2)~(-5 ± 2)℃, 冻融液温度 -25 ~ 20℃, 冻融循环 1 次历时 2 ~ 4 h(融化时间不少于整个冻融历时的 25%), 采用热电偶测量试件中心温度时, 精度达 0.3℃, 试件中心和表面的温差小于 28℃, 冻和融之间的转换时间不超过 10 min。

当冻融循环到达某一设计冻融次数时, 从试验箱中拿出其中 1 组试件, 进行断裂能试验, 而其余各组试

件继续进行后续的冻融循环,直至完成最后的循环次数。

各次冻融的混凝土试件的断裂能测定在河海大学结构力学试验室内完成,试验装置如图 2 所示。

2 试验结果与分析

断裂能测试的试件尺寸为 100 mm × 100 mm × 400 mm,支距为 300 mm,预制裂缝深度为 40 mm。断裂能计算公式为

$$G_F = \frac{1}{b(d-a_0)} \int_0^{\delta_{\max}} p d\delta$$

(1)

式中: G_F ——断裂能, $N \cdot m/m^2$; p ——荷载, N ; b ——试件截面宽度, m ; d ——试件截面高度, m ; a_0 ——裂缝深度, m ; $\delta_{\max}$ ——预制裂缝试件加力点处的最大位移, mm 。

2.1 不同冻融循环次数混凝土荷载与位移的关系

通过采集的整个试验过程的数据,作出不同冻融次数的混凝土所受荷载与中心位移的关系图,如图 3 所示。所谓中心位移,是指带裂缝三点弯曲梁加力点处的位移(图 2)。

可以看出(a)混凝土承载能力随着冻融循环次数的增加而降低。以 C20 普通混凝土为例,未冻融试件最大承载力可达 2.87 kN 左右,而冻融 30 次的试件最大承载力只有 1.83 kN 左右。(b)随着冻融次数的增加,冻融试件开裂屈服提前。未冻融试件在中心位移 0.45 mm 时发生断裂,而经冻融后的试件,中心位移不到 0.25 mm 就发生断裂。

2.2 不同冻融循环次数混凝土断裂能测试结果

断裂能是衡量材料断裂性能的重要指标之一,可以用来描述材料对裂纹扩展阻力的大小。断裂能数值越大,表明材料阻裂效果越好^[1]。利用混凝土荷载与中心位移关系曲线(图 3)和式(1)可计算出不同冻融次数混凝土断裂能,结果如图 4 所示。

从图 4 可知,混凝土断裂能冻融次数由 0 次变为 10 次时断裂能降低仅 0.6%,表明混凝土内部损伤较小;冻融 20 次时,断裂能降低了 14%;冻融 30 次时,断裂能降低了 18.6%。由 10 次变为 20 次时断裂能下降明显。可见,普通混凝土断裂能随着冻融循环次数的增加而逐渐降低,开始时降低较为缓慢,到 10 次以后内部损伤速度明显加快。到 30 次冻融循环时断裂能就已经降低了 18.6%,这与测试的混凝土相对动弹模变化规律(表 1)基本一致,说明断裂能这一参数能反映混凝土冻融循环造成的内部损伤及损伤累计的变化规律。

2.3 混凝土断裂能与冻融循环次数关系分析

根据上述试验数据进行回归分析,可以得到混凝土断裂能与冻融循环次数的关系:

$$G_F = -0.0025N^2 - 0.0943N + 24.502$$

(2)

式中 N 为冻融次数,相关系数为 $R^2 = 0.9125$ 。利用式(2)可估算具体冻融循环下的混凝土断裂能。需要指出的是,由于试验组数有限,式(2)的相关系数偏小,需通过更多试验数据对其进行改进。



图 1 DDR-2 型混凝土快速冻融试验机
Fig. 1 DDR-2 rapid freeze-thaw test machine for concrete



图 2 冻融混凝土断裂能试验装置
Fig. 2 Test devices for fracture release energy of freeze-thaw concrete

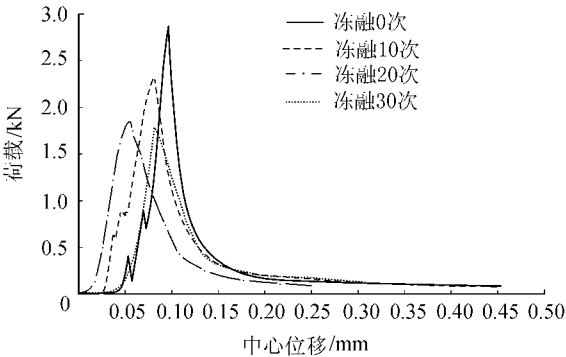


图 3 不同冻融次数混凝土荷载与中心位移关系
Fig. 3 Relationship between concrete load and central displacement with different freeze-thaw cycles

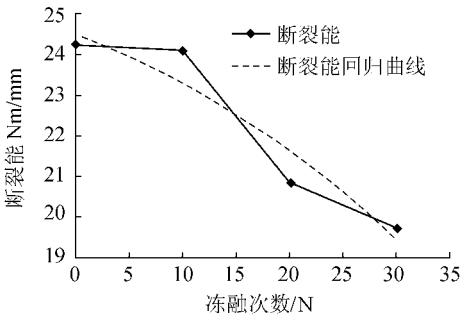


图 4 断裂能随冻融次数的变化规律
Fig. 4 Variation of fracture release energy with number of freeze-thaw cycles

表 1 各次冻融混凝土的最大试验荷载与断裂能、相对动弹模的关系			
Table 1 Maximum concrete load and fracture release energy with different freeze-thaw cycles			
冻融次数/ 次	最大荷载/ kN	断裂能/ ($N \cdot m \cdot m^{-2}$)	相对动弹模/%
0	2.869	24.24	100
10	2.353	24.10	99
20	1.838	20.85	93
30	1.834	19.73	86

3 结 论

a. 通过试验研究,揭示了冻融循环作用下混凝土断裂能变化规律,即混凝土承载能力随着冻融循环次数的增加而降低,随着冻融次数的增加,试件开裂点提前,断裂能损失与相对动弹模损失率的变化规律基本一致,表明断裂能也可作为衡量混凝土冻融损伤的一个重要指标。

b. 根据试验数据,得出了普通混凝土断裂能与冻融循环次数的关系式,该关系式可作为冻融损伤混凝土分析的依据。

参考文献:

- [1] 杨英姿,巴恒静.负温防冻剂混凝土的界面显微结构与性能[J].硅酸盐学报,2007,35(8):1125-1130.(YANG Ying-zi,BA Heng-jing. Interface microstructure and mechanical properties of concrete with antifreezing admixture at subzero temperature[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2007, 35(8):1125-1130.(in Chinese))
- [2] 李金玉,曹建国,徐文雨,等.混凝土冻融破坏机理的研究[J].水利学报,1999,30(1):41-49.(LI Jin-yu,CAO Jian-guo,XU Wen-yu,et al. Study on the mechanism of concrete destruction under frost action[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 30(1):41-49.(in Chinese))
- [3] 宋玉普,商怀帅,张众,等.冻融循环后引气混凝土双轴破坏准则研究[J].工程力学,2007,24(6):134-141.(SONG Yu-pu,SHANG Huai-shuai,ZHANG Zhong,et al. Investigation on failure criterion of air-entrained concrete under biaxial loads after freeze-thaw cycles[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(6):134-141.(in Chinese))
- [4] 蔡昊,覃维祖,刘西拉.砂浆孔隙水结冰规律的研究[J].混凝土,1997(6):9-13.(CAI Hao,QIN Wei-zu,LIU Xi-la. Study on the freezing pore water in mortar[J]. Concrete, 1997(6):9-13.(in Chinese))
- [5] 覃丽坤.高温及冻融循环后混凝土多轴强度和变形试验研究[D].大连:大连理工大学,2004.
- [6] 王立成.寒冷海洋环境条件下轻骨料混凝土的多轴强度准则和本构关系研究[D].大连:大连理工大学,2005.
- [7] 商怀帅,宋玉普,覃丽坤,等.冻融循环后在三向受压荷载下混凝土性能的试验研究[J].水利学报,2006,37(7):874-879.(SHANG Huai-shuai,SONG Yu-pu,QIN Li-kun,et al. Experimental study on properties of concrete under triaxial compression after freeze-thaw cycles[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(7):874-879.(in Chinese))
- [8] 张众.冻融及高温后混凝土多轴力学特性试验研究[D].大连:大连理工大学,2006.
- [9] 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 Dan-ying,CHENG Hong-qiang. 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))
- [10] 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 Zuo-jun,BA Heng-jing,et al. 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))
- [11] 杨勇,任青文.钢纤维混凝土力学性能试验研究[J].河海大学学报:自然科学版,2006,34(1):63-67.(YANG Yong,REN Qing-wen. Experimental study on mechanical performance of steel fibre reinforced concrete[J]. Journal of Hohai University:Natural Sciences, 2006, 34(1):63-67.(in Chinese))

Fracture release energy for ordinary concrete with freeze-thaw cycles

YU Xiao-ming^{1,2}, REN Qing-wen¹

(1. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Planning Department of Xuzhou Water Resources Bureau, Xuzhou 221002, China)

Abstract: In order to study the influence of freeze-thaw cycles on the fracture properties of ordinary concrete, rapid freeze-thaw cycle tests were carried out on concrete according to the relevant specifications. The fracture release energy of four groups of C20 concrete specimens with 0, 10, 20, and 30 freeze-thaw cycles was tested. The test results show that the fracture release energy of the concrete gradually decreases with the freeze-thaw cycles. The variation pattern of the loss of the fracture release energy is basically the same as that of the relatively dynamic Yang's modulus. The fracture release energy can also be an important index for the evaluation of the freeze-thaw damage of the concrete.

Key words: freeze-thaw failure; fracture release energy; concrete