

不同超低温温度区间冻融循环作用 混凝土弹性模量软化性能试验研究

时旭东, 李亚强, 钱 磊, 李俊林, 汪文强

(清华大学土木工程系, 北京 100084)

摘 要: 通过混凝土经历 $10^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ 、 $10^{\circ}\text{C}\sim 80^{\circ}\text{C}$ 和 $10^{\circ}\text{C}\sim 160^{\circ}\text{C}$ 等 3 种典型的超低温温度区间冻融循环作用试验, 探讨不同的温度区间和冻融循环作用次数对混凝土弹性模量的影响。结果表明, 随冻融循环作用次数的增加, 上限温度时因冻融损伤累积使混凝土的弹性模量呈逐渐软化趋势, 其中下限温度较低温度区间的变化趋势最为明显; 下限温度时因混凝土内孔隙水结冰使混凝土弹性模量呈先增大后减小趋势, 且较上限温度时的变化幅度更大。不同温度区间的混凝土相对弹性模量差以及上下限温度时单次冻融软化指标和累积冻融软化指标均存在明显的差异且变化规律较为复杂。该文还由试验结果拟合出混凝土相对弹性模量与超低温冻融循环作用的温度区间和次数间的关系式。所获得的这些结果可为 LNG 储罐类混凝土结构的设计和安全性能评估提供参考。

关键词: 混凝土; 超低温; 冻融循环作用; 温度区间; 弹性模量

中图分类号: TU528.1 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2018.07.0386

EXPERIMENTAL STUDY ON ELASTIC MODULUS OF CONCRETE UNDERGOING FREEZE-THAW CYCLE ACTION WITH DIFFERENT ULTRALOW TEMPERATURE RANGES

SHI Xu-dong, LI Ya-qiang, QIAN Lei, LI Jun-lin, WANG Wen-qiang

(Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Through experiments of concrete experiencing freeze-thaw cycle action with three typical ultralow temperature ranges of $10^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$, $10^{\circ}\text{C}\sim 80^{\circ}\text{C}$ and $10^{\circ}\text{C}\sim 160^{\circ}\text{C}$, the effects of different temperature ranges and freeze-thaw cycles on concrete elastic modulus are investigated. The test results show that with increase in the freeze-thaw action cycles the concrete elastic moduli at upper limit temperature are decreasing due to damage accumulation from freeze-thaw cycle action, and their changing trends are most obvious for the temperature range of which the lower limit temperature is lower; the concrete elastic moduli at lower limit temperature increases first due to freezing of the pore water inside concrete and then decreases with increase in the freeze-thaw action cycles, and their changing ranges are greater than those at the upper limit temperature. The concrete relative elastic modulus difference, single freeze-thaw softening index, and cumulative freeze-thaw softening index of concrete relative elastic modulus at upper and lower limit temperatures for different temperature ranges, are obviously different and their variation regularities are also more complex. The test results also reveal the relationship between the concrete relative elastic modulus and the factors of temperature range and freeze-thaw action cycles

收稿日期: 2018-07-13; 修改日期: 2018-12-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478242, 51878375)

通讯作者: 李亚强(1994—), 河北人, 男, 硕士生, 主要从事超低温混凝土研究(E-mail: lyqthu@163.com).

作者简介: 时旭东(1960—), 安徽人, 男, 教授, 博士, 博导, 主要从事混凝土结构研究(E-mail: shixd@mail.tsinghua.edu.cn);

钱 磊(1994—), 河南人, 男, 硕士生, 主要从事超低温混凝土研究(E-mail: qianlei9405@163.com);

李俊林(1992—), 重庆人, 男, 硕士生, 主要从事超低温混凝土研究(E-mail: li-jl10@foxmail.com);

汪文强(1993—), 湖北人, 男, 硕士生, 主要从事超低温混凝土研究(E-mail: wangwq0124@163.com).

under ultralow temperature. These results can provide reference for the design and safety performance evaluation of the LNG storage tank.

Key words: concrete; ultralow temperature; freeze-thaw cycle action; temperature range; elastic modulus

天然气不同于石油、煤炭在开采及使用中造成环境的污染破坏,作为清洁能源有着不可替代的优势。它通常采用常压液态的储存方式以减小其体积,但此时的温度约为 -165°C ,属于超低温范畴^[1-2]。已有的研究表明,混凝土超低温环境下有着良好的性能,适宜用作液化天然气(LNG)储罐类结构的受力材料^[3-4]。超低温下的温度波动必然对混凝土内部结构造成影响,引起其性能变化。Miura^[5]通过试验给出,混凝土的劣化主要发生在 $-20^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$ 之间。当冻融作用的温度变化速率较快时,混凝土弹性模量的损失也会更快。Berner^[6]指出,混凝土低温下的应力-应变关系受含水率、降温速率和骨料类型的影响。在试件尺寸足够小而不受温度应力的影响时,可观测到较快的降温速率导致混凝土弹性模量增长更多。本文作者所在的课题组也在混凝土超低温冻融循环作用性能方面进行了一些研究^[7-10]。总之,目前有关混凝土超低温冻融作用性能方面的研究尚处于起步阶段,对于不同超低温温度区间冻融作用下混凝土弹性模量等变形性能方面的探讨则更少,并且已有的研究所获得的结果多受限于特定的探讨条件,不具普适性。本文将结合前期相关方面的研究情况探讨混凝土经历不同超低温温度区间冻融循环作用后其上下限温度时的弹性模量软化性能变化规律,以便为 LNG 类储罐混凝土结构设计提供参考和依据。

1 试验概况

一般 LNG 类储罐混凝土结构遭受超低温冻融的温度区间众多,不同的冻融作用温度区间可能对混凝土弹性模量软化性能产生不同的影响。本次试验根据已有的相关研究情况,选取 $10^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ 、 $10^{\circ}\text{C}\sim -80^{\circ}\text{C}$ 及 $10^{\circ}\text{C}\sim -160^{\circ}\text{C}$ 等 3 种冻融循环作用温度区间进行考察。

所有试件均由自行研制的超低温试验炉施加给定的超低温冻融循环作用工况。考虑混凝土的热惰性,为避免超低温冻融循环作用过程中试件内温度梯度过大采用较小的升降温速率。根据已有的试验结果^[11],所有经历超低温作用试件的升降温速率统一设为 $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$,并在达到给定的上下限温度时保持至少 4.5 h 的恒温以保证此时试件的温度分布

均匀。达到给定的温度作用工况后通过与之配套的液压试验机对试件进行轴心加载获取其上下限温度时的混凝土弹性模量,并由专用的量测装置和数据采集系统对施加的荷载及试件变形等进行实时采集记录。图 1 是混凝土经历超低温冻融循环作用其弹性模量软化性能试验流程示意图,图 2 是超低温冻融循环作用混凝土弹性模量的试验装置。

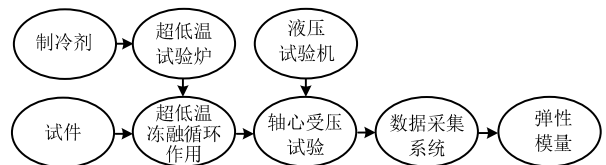


图 1 超低温冻融循环作用混凝土弹性模量软化性能试验流程示意图

Fig.1 Flow diagram of softening behavior experiments for elastic modulus of concrete undergoing freeze-thaw action under ultralow temperature



图 2 超低温冻融循环作用混凝土弹性模量试验装置

Fig.2 Test setup for elastic modulus of concrete undergoing freeze-thaw action under ultralow temperature

所有试件的形式均为 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 300\text{ mm}$ 棱柱体,其混凝土设计强度等级为 C50,并按超低温冻融循环作用温度区间分批进行浇注、标准养护 28 d 后放置室内常温静置。各温度区间冻融循环作用工况试件混凝土的配合比见表 2。其中,水泥采用 P.O 42.5 普通硅酸盐水泥,细骨料为河砂,粗骨料为碎石,掺合料为矿渣粉,减水剂为 PCA(I)型的高效减水剂,表 1 为试件混凝土的配合比。

表 1 试件混凝土的配合比 $/(\text{kg}/\text{m}^3)$

Table 1 Mix ratios of specimens

温度区间	水泥	砂	碎石	水	矿渣粉	外加剂
$10^{\circ}\text{C}\sim -40^{\circ}\text{C}$	300	698	1047	152	150	5.85
$10^{\circ}\text{C}\sim -80^{\circ}\text{C}$	300	698	1047	152	150	5.85
$10^{\circ}\text{C}\sim -160^{\circ}\text{C}$	340	780	1034	167	30	5.55

表 2 是混凝土经历不同温度区间冻融循环作用的试验内容及其试件编号。其中,试件编号中 DR 表示超低温冻融循环作用;40、80 及 160 分别表示对应的超低温冻融循环作用温度区间的下限温度-40℃、-80℃和-160℃;紧随给定的试件混凝土含水率 W 的+10 表示超低温冻融循环作用温度区间的上限温度。这里所有温度区间的上限温度均取 10℃;最右边的数字则表示给定温度作用工况的试件顺序编号。试件在给定的温度区间经历由上限温度或下限温度开始通过升降温作用再回至该温度的循环均记为 1 次超低温冻融循环作用,并将首次由上限温度降至下限温度记作 0.5 次冻融循环作用。

表 2 试验内容及其试件编号
Table 2 Experiment contents and specimen numbers

试件编号	N_0	$T/(^{\circ}\text{C})$	试件编号	N_0	$T/(^{\circ}\text{C})$
温度区间 10℃~-40℃					
DR40W+10-1~2	0	10	DR40W+10-13~14	0.5	-40
DR40W+10-3~4	1		DR40W+10-15~16	1.5	
DR40W+10-5~6	3		DR40W+10-17~18	3.5	
DR40W+10-7~8	6		DR40W+10-19~20	6.5	
DR40W+10-9~10	10		DR40W+10-21~22	10.5	
DR40W+10-11~12	15		DR40W+10-23~24	15.5	
温度区间 10℃~-80℃					
DR80W+10-1~2	10.5	-80	DR80W+10-15~16	40.5	10
DR80W+10-3~4	20.5		DR80W+10-17~18	35.5	
DR80W+10-5~6	25.5		DR80W+10-25~26	5.5	
DR80W+10-7~8	30.5		DR80W+10-19~20	25	
DR80W+10-9~10	58.5		DR80W+10-21~22	15	
DR80W+10-11~12	0.5		DR80W+10-23~24	10	
DR80W+10-13~14	45.5		DR80W+10-27~28	0	
温度区间 10℃~-160℃					
DR160W+10-1~2	0	10	DR160W+10-15~16	25.5	-160
DR160W+10-3~4	5		DR160W+10-17~18	20.5	
DR160W+10-5~6	10		DR160W+10-19~20	15.5	
DR160W+10-7~8	15		DR160W+10-21~22	10.5	
DR160W+10-9~10	20		DR160W+10-23~24	5.5	
DR160W+10-11~12	25		DR160W+10-25~26	0.5	
DR160W+10-13~14	30				

注: N_0 为给定温度区间的冻融循环作用次数。对于上限温度时的冻融循环作用次数 $N=N_0$, 对于下限温度时的冻融循环作用次数 $N=N_0-0.5$; T 为加载时温度。

2 经历不同温度区间冻融循环作用的混凝土弹性模量

经历不同超低温温度区间冻融循环作用试件,上下限温度时加载的破坏过程声响和破坏状况等不尽相同,其混凝土受压强度变化规律也表现出明显的差异,详情见文献[12]。表 3 仅是通过对经历

不同超低温温度区间的冻融循环作用试件加载获得的混凝土弹性模量试验结果。为便于分析比较,将经历超低温冻融循环作用后混凝土的弹性模量平均值 E_C^{FT} 除以未经冻融循环作用混凝土的常温弹性模量 E_C , 获取其基于常温相对弹性模量($\lambda_{E0}^{FT} = E_C^{FT} / E_C$); 将经历超低温冻融循环作用后混凝土上限温度(下限温度)时的弹性模量除以未经冻融混凝土上限温度(下限温度)时的弹性模量, 定义为其上限温度(下限温度)时相对弹性模量; 将经历第 N 次与第 $N-1$ 次冻融循环作用获取的混凝土上限温度(下限温度)时相对弹性模量间差值除以经历第 $N-1$ 次冻融循环作用混凝土上限温度(下限温度)相对弹性模量, 定义为混凝土弹性模量第 N 次冻融循环作用上限温度(下限温度)时单次冻融软化指标; 将经历第 N 次冻融循环作用与未经冻融循环作用获取的混凝土上限温度(下限温度)时相对弹性模量差值除以未经冻融循环作用混凝土上限温度(下限温度)时相对弹性模量, 定义为混凝土弹性模量第 N 次冻融循环作用上限温度(下限温度)时累积冻融软化指标。

表 3 超低温冻融循环作用混凝土的弹性模量试验结果
Table 3 Test results of elastic modulus of concrete undergoing ultralow temperature freeze-thaw cycle action

试件编号	基于常温相对弹性模量平均值	试件编号	基于常温相对弹性模量平均值
温度区间 10℃~-40℃			
DR40W+10-1~2	1.00	DR40W+10-13~14	1.19
DR40W+10-3~4	0.94	DR40W+10-15~16	1.26
DR40W+10-5~6	1.05	DR40W+10-17~18	1.21
DR40W+10-7~8	0.91	DR40W+10-19~20	1.24
DR40W+10-9~10	0.81	DR40W+10-21~22	1.29
DR40W+10-11~12	0.89	DR40W+10-23~24	1.26
温度区间 10℃~-80℃			
DR80W+10-1~2	1.55	DR80W+10-15~16	1.12
DR80W+10-3~4	1.31	DR80W+10-17~18	1.30
DR80W+10-5~6	1.46	DR80W+10-25~26	1.60
DR80W+10-7~8	1.35	DR80W+10-19~20	0.90
DR80W+10-9~10	0.81	DR80W+10-21~22	1.00
DR80W+10-11~12	1.18	DR80W+10-23~24	1.01
DR80W+10-13~14	1.12	DR80W+10-27~28	1.00
温度区间 10℃~-160℃			
DR160W+10-1~2	1.00	DR160W+10-15~16	1.45
DR160W+10-3~4	-	DR160W+10-17~18	1.32
DR160W+10-5~6	1.18	DR160W+10-19~20	1.48
DR160W+10-7~8	1.01	DR160W+10-21~22	1.42
DR160W+10-9~10	0.98	DR160W+10-23~24	1.59
DR160W+10-11~12	0.86	DR160W+10-25~26	1.23
DR160W+10-13~14	0.73		

2.1 温度区间 10℃~ -40℃的混凝土弹性模量软化规律

图 3 是温度区间 10℃~-40℃冻融循环作用试件上下限温度时加载获得的混凝土基于常温相对弹性模量 λ_{E0}^{FT} 随冻融循环作用次数 N_0 的变化情况。

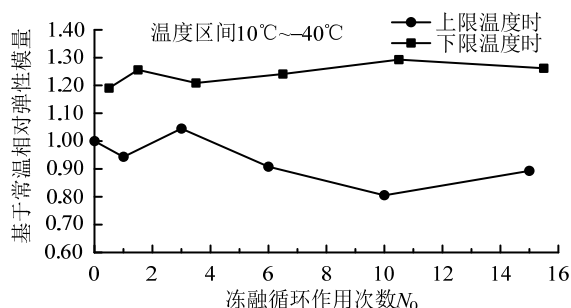


图 3 温度区间 10℃~-40℃冻融循环作用混凝土基于常温相对弹性模量软化规律

Fig.3 Softening regularities of normal temperature based relative elastic modulus of concrete undergoing freeze-thaw cycle action with temperature range from 10℃~-40℃

从图 3 可以看出, 下限温度时混凝土基于常温相对弹性模量 λ_{E0}^{FT} 较上限温度时有较大幅度的提升, 二者随冻融循环作用次数 N_0 增加的变化趋势也有明显的差异。上限温度时, 冻融循环作用初期 λ_{E0}^{FT} 有波动地上升态势。但之后随 N_0 增加便开始呈现较为明显的下降趋势, 直至 $N_0 > 10$ 才有所恢复, 不过此时仍低于常温时; 而下限温度时, λ_{E0}^{FT} 随 N_0 增加, 虽冻融初期稍有波动, 但基本上呈现出缓慢上升态势, λ_{E0}^{FT} 并未显现出软化特征。

图 4 是温度区间 10℃~-40℃冻融循环作用混凝土上下限温度时相对弹性模量间差值 $\Delta\lambda_{ED}^{FT} = \lambda_{EU}^{FT} - \lambda_{EL}^{FT}$ 随冻融循环作用次数 N 的变化图。

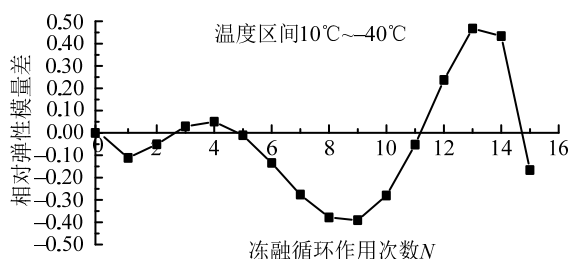


图 4 温度区间 10℃~-40℃上下限温度时混凝土相对弹性模量差变化规律

Fig.4 Variation regularities of concrete relative elastic modulus difference between upper and lower limit temperature with freeze-thaw temperature range from 10℃~-40℃

由图 4 可以看出, 冻融循环作用初期的相对弹性模量差 $\Delta\lambda_{ED}^{FT}$ 基本上在 0 附近波动。这表明冻融循环作用初期的上下限温度时混凝土相对弹性模

量 λ_E^{FT} 变化趋势基本上一致或二者的变化幅度均较小; 但 N 达约 5 次后, 上下限温度时的 λ_E^{FT} 变化趋势则呈明显的背离状, 致使 $\Delta\lambda_{ED}^{FT}$ 不仅呈波动状, 而且幅度也显著地加大。可见, 混凝土上下限温度时相对弹性模量差随 N 的增加变得极其复杂。

图 5 和图 6 分别为温度区间 10℃~-40℃冻融循环作用试件上下限温度时加载获得的混凝土相对弹性模量单次冻融软化指标和累积冻融软化指标的变化规律图。

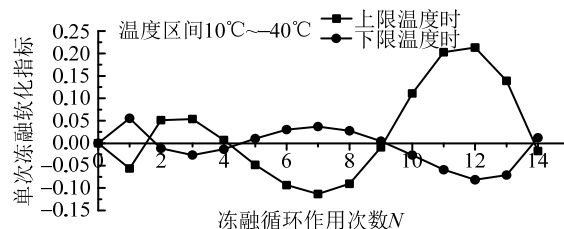


图 5 温度区间 10℃~-40℃上下限温度时混凝土弹性模量单次冻融软化指标变化规律

Fig.5 Variation regularities of single freeze-thaw cycle softening index of concrete elastic modulus at upper and lower limit temperature with temperature range from 10℃~-40℃

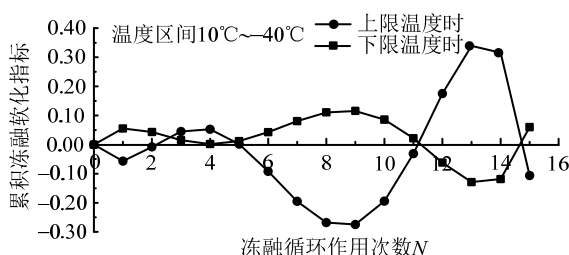


图 6 温度区间 10℃~-40℃上下限温度时混凝土弹性模量累积冻融软化指标变化规律

Fig.6 Variation regularities of cumulative freeze-thaw cycle softening index of concrete elastic modulus at upper and lower limit temperature with temperature range from 10℃~-40℃

从图 5 可以看出, 上下限温度时混凝土相对弹性模量单次冻融软化指标 k_E^s 随冻融循环作用次数 N 的增加变化较为复杂, 二者均呈波动且逐渐放大的变化态势。冻融循环作用开始阶段, 上下限温度时的 k_E^s 均呈较小的波动表明此时的混凝土弹性模量下降或提高不大; 之后随 N 的增加, 二者波动差异明显。上限温度时的 k_E^s 波动幅度显著地加大, 而下限温度时的 k_E^s 波动幅度则较前有所增大但不明显。整个冻融循环作用过程中, 上下限温度时混凝土相对弹性模量单次冻融软化指标相互间始终呈反向波动变化态势。

从图 6 可以看出, 温度区间 10℃~-40℃上下限温度时混凝土相对弹性模量累积冻融软化指标 k_E^m

随 N 增加也呈较为复杂的变化特性。冻融循环作用开始阶段, 上下限温度时的 k_E^m 随 N 增加也均呈较小幅度的波动状态; $N > 5$ 之后, 它们的波动幅度开始放大。其中, 上限温度时的 k_E^m 波动幅度明显比下限温度时大。在本次试验所进行的冻融循环作用次数范围内, 上限温度时的 k_E^m 在冻融开始不久便变成负值, 但随后混凝土弹性模量未见呈现逐渐恶化趋势; 而下限温度时的 k_E^m 在 $N < 11$ 之前始终为正值, 这表明冻融循环作用导致的混凝土损伤, 在其冻融开始阶段是有利于混凝土下限温度时弹性模量的提高。

2.2 温度区间 $10^\circ\text{C} \sim 80^\circ\text{C}$ 的混凝土弹性模量软化规律

图 7 是温度区间 $10^\circ\text{C} \sim 80^\circ\text{C}$ 冻融循环作用试件上下限温度时加载获得的混凝土基于常温相对弹性模量 λ_{E0}^{FT} 随冻融循环作用次数 N_0 的变化情况。

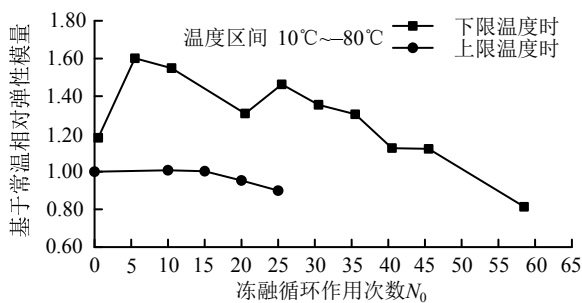


图 7 温度区间 $10^\circ\text{C} \sim 80^\circ\text{C}$ 冻融循环作用混凝土基于常温相对弹性模量软化规律

Fig.7 Softening regularities of normal temperature based relative elastic modulus of concrete undergoing freeze-thaw cycle action with temperature range from $10^\circ\text{C} \sim 80^\circ\text{C}$

从图 7 可以看出, 此温度区间上限温度时 λ_{E0}^{FT} 在 $N_0 < 10$ 时基本上呈恒定态势, 之后稍有下降。总之, 其变化不剧烈。下限温度时 λ_{E0}^{FT} 经历了先增大后减小的变化趋势。 $N_0 < 5$ 次时的 λ_{E0}^{FT} 较上限温度时呈明显的上升趋势; 之后则呈具有波动状的明显下降趋势; $N_0 > 50$ 后, λ_{E0}^{FT} 开始小于 1, 甚至低于上限温度时的 λ_{E0}^{FT} 。这说明此温度区间的冻融循环作用达一定次数后, 混凝土下限温度时弹性模量因超低温冻融产生的累积损伤也将产生显著的软化现象。

图 8 是温度区间 $10^\circ\text{C} \sim -80^\circ\text{C}$ 冻融循环作用混凝土上下限温度时混凝土相对弹性模量间差值 $\Delta\lambda_{\text{ED}}^{\text{FT}} = \lambda_{\text{EU}}^{\text{FT}} - \lambda_{\text{EL}}^{\text{FT}}$ 随冻融循环作用次数 N 的变化图。

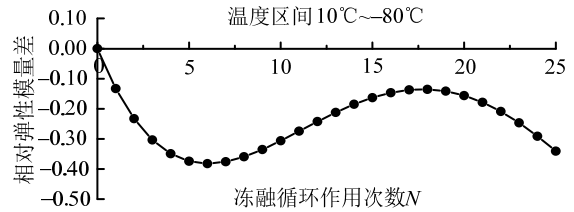


图 8 温度区间 $10^\circ\text{C} \sim -80^\circ\text{C}$ 上下限温度时混凝土相对弹性模量差变化规律

Fig.8 Variation regularities of concrete relative elastic modulus difference between upper and lower limit temperature with freeze-thaw cycle temperature range from $10^\circ\text{C} \sim -80^\circ\text{C}$

由图 8 可见, 温度区间 $10^\circ\text{C} \sim -80^\circ\text{C}$ 混凝土相对弹性模量差 $\Delta\lambda_{\text{ED}}^{\text{FT}}$ 变化与温度区间 $10^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$ 相比有很大的不同。整个试验所进行的冻融循环作用次数范围内, $\Delta\lambda_{\text{ED}}^{\text{FT}}$ 均保持负值。这说明下限温度时的 λ_E^{FT} 增长显著高于上限温度时。 $\Delta\lambda_{\text{ED}}^{\text{FT}}$ 冻融初期便一直下降, 说明此时上下限温度时的 λ_E^{FT} 变化趋势呈现出较大的反差。 $N > 6$ 次后 $\Delta\lambda_{\text{ED}}^{\text{FT}}$ 开始回升, 反差变小, 但呈波动变化状。

图 9 和图 10 分别为温度区间 $10^\circ\text{C} \sim -80^\circ\text{C}$ 冻融循环作用试件上下限温度时加载获得的混凝土相对弹性模量单次冻融软化指标和累积冻融软化指标变化规律图。

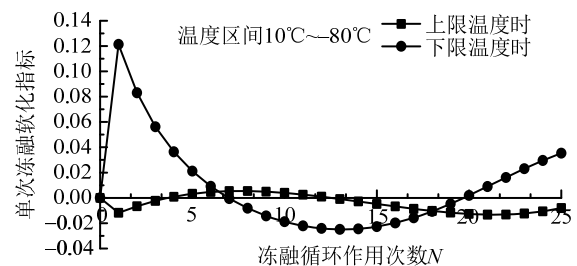


图 9 温度区间 $10^\circ\text{C} \sim -80^\circ\text{C}$ 上下限温度时混凝土弹性模量单次冻融软化指标变化规律

Fig.9 Variation regularities of single freeze-thaw cycle softening index of concrete elastic modulus at upper and lower limit temperature with temperature range from $10^\circ\text{C} \sim -80^\circ\text{C}$

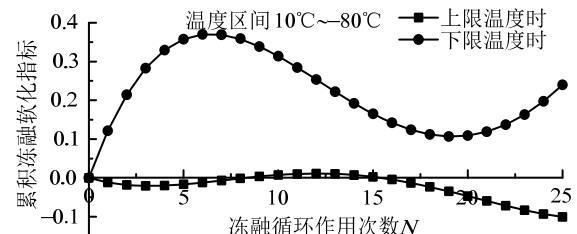


图 10 温度区间 $10^\circ\text{C} \sim -80^\circ\text{C}$ 上下限温度时混凝土弹性模量累积冻融软化指标变化规律

Fig.10 Variation regularities of cumulative freeze-thaw cycle softening index of concrete elastic modulus at upper and lower limit temperature with temperature range from $10^\circ\text{C} \sim -80^\circ\text{C}$

从图 9 可见, 此温度区间上下限温度时混凝土相对弹性模量单次冻融软化指标 k_E^s 随冻融循环作用次数 N 的变化幅度更小。冻融循环作用开始阶段, 下限温度时的 k_E^s 先变大, 然后在 N 约为 7 次时降低至 0。这说明初期混凝土弹性模量有一定程度的提升。之后 k_E^s 开始减小, 混凝土弹性模量开始呈软化态势, 不过随 N 变化幅度不再明显。上限温度的 k_E^s 则基本上保持在 0 附近, 仅在 $N > 15$ 之后, 混凝土弹性模量软化开始稍明显, k_E^s 保持负值且不断地减小, 但其幅度明显低于下限温度时。

从图 10 可以看出, 下限温度时混凝土相对弹性模量累积冻融软化指标 k_E^m 虽经历 7 次冻融循环作用后开始下降, 但均为正值。这表明混凝土因冻融作用产生的累积损伤并未能抵消超低温对其弹性模量的硬化作用; 上限温度时, k_E^m 在 N 约 17 次前基本上保持在 0 附近。这说明此间混凝土弹性模量变化不明显。但此后 k_E^m 随 N 开始呈逐渐明显的减小趋势。

2.3 温度区间 $10^\circ\text{C} \sim -160^\circ\text{C}$ 的混凝土弹性模量软化规律

图 11 是温度区间 $10^\circ\text{C} \sim -160^\circ\text{C}$ 冻融循环作用试件上下限温度时加载获得的混凝土基于常温相对弹性模量 λ_{E0}^{FT} 随冻融循环作用次数 N_0 的变化情况。

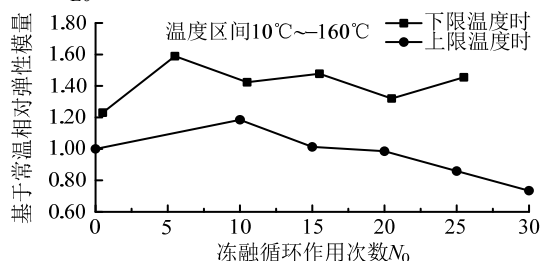


图 11 温度区间 $10^\circ\text{C} \sim -160^\circ\text{C}$ 冻融循环作用混凝土基于常温相对弹性模量软化规律

Fig.11 Softening regularities of normal temperature based relative elastic modulus of concrete undergoing freeze-thaw cycle action at temperature range from $10^\circ\text{C} \sim -160^\circ\text{C}$

从图 11 可以看出, 温度区间 $10^\circ\text{C} \sim -160^\circ\text{C}$ 冻融循环作用混凝土的弹性模量变化规律与前两个温度区间不同。上限温度时, 冻融循环作用初期 λ_{E0}^{FT} 稍有提升, 但 $N_0 > 10$ 之后便随 N_0 增加开始呈持续下降趋势。 N_0 达 30 次时 λ_{E0}^{FT} 已降低至 0.7 左右; 而下限温度时的 λ_{E0}^{FT} 则开始上升明显, 之后呈波动状且整体上稍有下降的变化趋势。

图 12 是温度区间 $10^\circ\text{C} \sim -160^\circ\text{C}$ 冻融循环作用

混凝土上下限温度时相对弹性模量间差值 $\Delta\lambda_{ED}^{\text{FT}} = \lambda_{EU}^{\text{FT}} - \lambda_{EL}^{\text{FT}}$ 随冻融循环作用次数 N 的变化图。

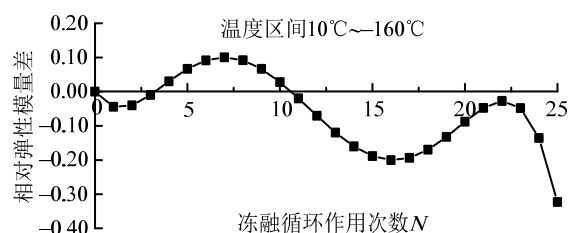


图 12 温度区间 $10^\circ\text{C} \sim -160^\circ\text{C}$ 上下限温度时混凝土相对弹性模量差变化规律

Fig.12 Variation regularities of concrete relative elastic modulus difference between upper and lower limit temperature with freeze-thaw cycle temperature range from 10°C to -160°C

经历温度区间 $10^\circ\text{C} \sim -160^\circ\text{C}$ 冻融循环作用混凝土的 $\Delta\lambda_{ED}^{\text{FT}}$ 变化大体上呈下降趋势, 但期间存在多次峰谷且不同冻融阶段有所不同。 $N < 11$ 次时, $\Delta\lambda_{ED}^{\text{FT}}$ 的变化幅度较小, 其值保持在 $-0.1 \sim 0.1$ 之间, 之后的 $\Delta\lambda_{ED}^{\text{FT}}$ 才有所增大、且始终为负值。这说明此温度区间冻融循环作用初期上下限温度时的混凝土相对弹性模量变化趋势差异较小, 之后下限温度时的增长显著高于上限温度时。可见, 经历该温度区间冻融循环作用混凝土的上下限温度时相对弹性模量变化趋势也较为复杂。

图 13 和图 14 分别为温度区间 $10^\circ\text{C} \sim -160^\circ\text{C}$ 冻融循环作用试件上下限温度时加载获得的混凝土相对弹性模量单次冻融软化指标和累积冻融软化指标变化规律图。

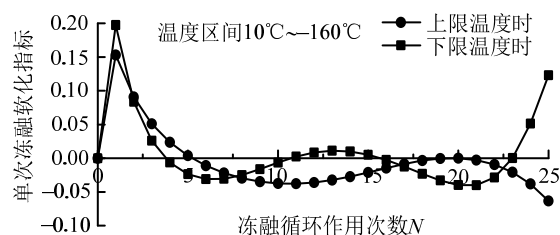


图 13 温度区间 $10^\circ\text{C} \sim -160^\circ\text{C}$ 上下限温度时混凝土弹性模量单次冻融软化指标变化规律

Fig.13 Variation regularities of single freeze-thaw cycle softening index of concrete elastic modulus at upper and lower limit temperature with temperature range from $10^\circ\text{C} \sim -160^\circ\text{C}$

从图 13 可以看出, 此温度区间上下限温度时的混凝土弹性模量单次冻融软化指标 k_E^s 变化规律呈现出较大的相似性。上下限温度时的 k_E^s 均在初期稍有提升, 然后呈较为稳定的波动状态, 但最终发展趋势有所不同。下限温度时的 k_E^s 最终大于 0, 而上限温度时则与之相反。这说明此温度区间下限

温度时冻融循环作用 25 次并未能使混凝土刚度恶化,超低温下混凝土内的孔隙水迁移结冰反而使其密实性增强。

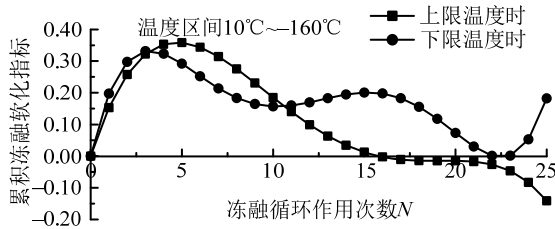


图 14 温度区间 10℃~160℃ 上下限温度时混凝土弹性模量累积冻融软化指标变化规律

Fig.14 Variation regularities of damage index of cumulative freeze-thaw cycle of concrete elastic modulus at upper and lower limit temperature with temperature ranges of 10℃~160℃

从图 14 可以看出,此温度区间上下限温度时混凝土弹性模量累积冻融软化指标 k_E^m 大多保持在 0 以上。上限温度时的 k_E^m 在 N 约为 15 次时减小为负值。说明随 N 增加,上限温度时混凝土弹性模量软化开始有所显现。下限温度时混凝土弹性模量在冻融循环初期提升明显,之后持续下降,但仍未见其软化。

3 不同冻融循环作用温度区间的混凝土弹性模量对比

3.1 冻融循环作用上限温度时混凝土弹性模量

图 15 将温度区间 10℃~40℃、10℃~80℃、10℃~160℃冻融循环作用试件上限温度时的混凝土相对弹性模量 λ_E^{FT} 进行了对比。从图 15 可以看出,不同温度区间的上限温度时混凝土弹性模量硬软化现象差异较大。当冻融循环作用次数 N 小于约 15 次时,下限温度低至-80℃后的混凝土弹性模量不仅不发生软化现象,反而随下限温度的降低还有所提高,出现硬化现象,不过硬化幅度较小。而下限温度高于-80℃的混凝土弹性模量无明显可见的硬化现象;当冻融循环作用次数 N 大于 15 次后,混凝土弹性模量均有软化现象且随 N 的增加呈逐渐下降趋势,下限温度越低混凝土弹性模量软化越显著。

为使拟合公式简单且便于工程应用,各温度区间均取冻融循环作用次数 $N=15$ 次处为上限温度时混凝土弹性模量随 N 变化趋势的转折点(此处的混凝土相对弹性模量记为 λ_{EUZ}^{FT}),不考虑 N 小于 15 次时下限温度 T_L 低于-80℃温度区间的混凝土弹性模量硬化现象,对 N 大于 15 次的混凝土相对弹性模

量按线性进行拟合。由本文的试验结果进行拟合可得上限温度时混凝土相对弹性模量 λ_E^{FT} 与冻融循环作用的温度区间(这里用其下限温度 T_L 表示)和次数 N 间的关系式:

$$\lambda_{EUZ}^{FT} = \begin{cases} 1 & , T_L \leq -80^\circ\text{C} \\ -0.0027T_L + 0.7869 & , -80^\circ\text{C} < T_L \leq -40^\circ\text{C} \end{cases}$$

$$\lambda_E^{FT} = \begin{cases} \frac{\lambda_{EUZ}^{FT} - 1}{15} N + \lambda_{EUZ}^{FT} & , N < 15 \\ 0.0001T_L (N - 15) + \lambda_{EUZ}^{FT} & , N \geq 15 \end{cases} \quad (1)$$

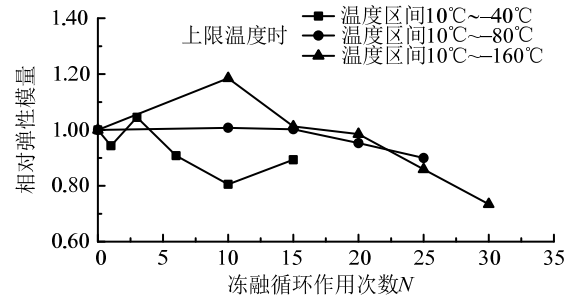


图 15 不同温度区间冻融循环作用上限温度时混凝土相对弹性模量对比

Fig.15 Comparison of different freeze-thaw action temperature ranges for concrete relative elastic modulus at upper limit temperature

3.2 冻融循环作用下限温度时混凝土弹性模量

图 16 将温度区间 10℃~40℃、10℃~80℃、10℃~160℃冻融循环作用试件在下限温度时的混凝土相对弹性模量 λ_E^{FT} 进行了对比。从图 16 可以看出,不同温度区间的下限温度时混凝土弹性模量存在硬化和软化现象,且硬化和软化现象均较为明显。其转折点随下限温度的降低而有所不同。下限温度越低时转折点所对应的冻融循环作用次数 N 越少。转折点处所对应的 λ_E^{FT} 在不同的温度区间变化也有所不同。下限温度高于-80℃的混凝土弹性模量随下限温度的降低而提高,但下限温度低至-80℃后却随下限温度的降低而下降。不过后者的下降幅度较前者的上升幅度要小。转折点前后的 λ_E^{FT} 随冻融循环作用次数的增加基本上呈线性变化趋势。

同样,为使拟合公式简单且便于工程应用,保守地将下限温度 T_L 不高于-80℃温度区间的转折点移至 $N=10$ 次处,这样各温度区间均可取冻融循环作用次数 $N=10$ 次处作为下限温度时混凝土弹性模量随 N 变化趋势的转折点(此处的混凝土相对弹性模量记为 λ_{ELZ}^{FT})。转折点两边的混凝土相对弹性模量 λ_E^{FT} 随 N 的变化均按线性进行拟合。由本文的

试验结果进行拟合可得下限温度时混凝土相对弹性模量 λ_E^{FT} 与冻融循环作用的温度区间(这里用其下限温度 T_L 表示)和次数 N_0 间的关系式:

$$\lambda_{ELZ}^{FT} = \begin{cases} 0.002T_L + 1.47, & -160^\circ\text{C} \leq T_L \leq -80^\circ\text{C} \\ -0.0057T_L + 0.858, & -80^\circ\text{C} < T_L \leq -40^\circ\text{C} \end{cases}$$

$$\lambda_E^{FT} = \begin{cases} \frac{\lambda_{ELZ}^{FT} - 1}{10} N + \lambda_{ELZ}^{FT}, & N < 10 \\ 0.00004T_L(N - 10) + \lambda_{ELZ}^{FT}, & N \geq 10 \end{cases} \quad (2)$$

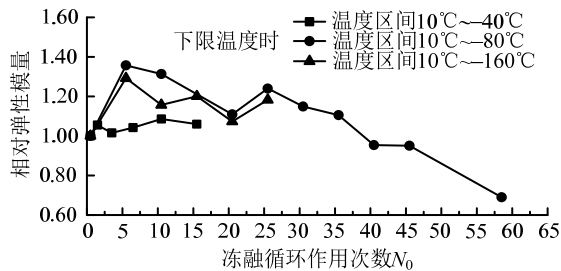


图 16 不同温度区间冻融循环作用下限温度时混凝土相对弹性模量对比

Fig.16 Comparison of different freeze-thaw cycle action temperature ranges for concrete relative elastic modulus at lower limit temperature

4 结论

(1) 经历不同超低温温度区间冻融循环作用混凝土上限温度时的弹性模量均呈下降趋势。其中温度区间 $10^\circ\text{C} \sim -160^\circ\text{C}$ 的下降趋势更为显著, 而另外两个温度区间则呈现出较为平缓态势。

(2) 经历不同超低温温度区间冻融循环作用混凝土下限温度时的弹性模量随冻融循环作用次数呈现出先增大后减小变化趋势。相较于上限温度时, 其变化幅度更大。

(3) 不同温度区间的混凝土上下限温度时相对弹性模量差随冻融循环作用次数的变化规律差异性较大, 但下限温度较低的温度区间相应的波动幅度较小。

(4) 不同温度区间的混凝土相对弹性模量单次冻融软化指标和累积冻融软化指标存在明显的差异。对于下限温度较高的温度区间, 下限温度时它们经历较多次冻融循环作用后仍为正值, 呈现出冻融初期有利于混凝土弹性模量现象。而随冻融循环作用次数继续增加, 下限温度较低温度区间的混凝土累积损伤将突显。

(5) 由试验结果拟合的混凝土相对弹性模量与超低温冻融循环作用的温度区间和次数间的关系

式可用于 LNG 储罐类混凝土结构的设计和安全性评估。

参考文献:

- [1] 张楠, 李景芳, 张志明, 等. 超低温环境混凝土研究与应用综述[J]. 混凝土, 2012(12): 27—29.
Zhang Nan, Li Jingfang, Zhang Zhiming, et al. State-of-art review on research and application of concrete at very low temperature [J]. Concrete, 2012(12): 27—29. (in Chinese)
- [2] Browne R D, Bamfourth P B. The use of concrete for cryogenic storage: A summary of research, past and present [C]// Concrete Soc Cryogenic Concrete: Proceedings of the 1st International Conference. London: Construction Press, 1982: 135.
- [3] Kogbara R B, Iyengar S R, Grasley Z C, et al. A review of concrete properties at cryogenic temperatures: Towards direct LNG containment [J]. Construction & Building Materials, 2013, 47(10): 760—770.
- [4] Dahmani L, Khenane A, Kaci S. Behavior of the reinforced concrete at cryogenic temperatures [J]. Cryogenics, 2007, 47(9): 517—525.
- [5] Miura T. The properties of concrete at very low temperatures [J]. Materials and Structures, 1989, 22(4): 243—254.
- [6] Berner D E. Behavior of prestressed concrete subjected to low temperatures and cyclic loading [R]. Berkeley (USA): California University, 1984.
- [7] 时旭东, 马驰, 张天申, 等. 不同强度等级混凝土 -190°C 时受压强度性能试验研究[J]. 工程力学, 2017, 34(3): 61—67.
Shi Xudong, Ma Chi, Zhang Tianshen, et al. Experimental study on compressive behavior of different strength grade concretes exposed -190°C [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(3): 61—67. (in Chinese)
- [8] 时旭东, 居易, 郑建华, 等. 混凝土低温受压强度试验研究[J]. 建筑结构, 2014(5): 29—33.
Shi Xudong, Ju Yi, Zheng Jianhua, et al. Experimental study on compressive strength of concrete exposed to cryogenic temperature [J]. Building Structure, 2014(5): 29—33. (in Chinese)
- [9] 吕超. 混凝土给定超低温作用区间冻融性能试验研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
Lv Chao. Experimental Study on Behavior of Concrete subjected to Freezing-thawing Action under Given Cryogenic [D]. Beijing: Tsinghua University, 2015. (in Chinese)
- [10] 刘超. 混凝土低温受力性能试验研究[D]. 北京: 清华大学, 2011.
Liu Chao. Experimental investigation on mechanical property of concrete exposed to low temperature [D]. Beijing: Tsinghua University, 2011. (in Chinese)

(参考文献[11]—[12]转第 140 页)

- unstiffened slender, moderate, and stocky low yield point steel plates [J]. *Thin-Walled Structures*, 2015, 88: 105—118.
- [14] Jin S, Ou J, Liew J Y R. Stability of buckling-restrained steel plate shear walls with inclined-slots: theoretical analysis and design recommendations [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2016, 117: 13—23.
- [15] DIN 1045-1, Plain, reinforced and prestressed concrete structures [S]. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2001.
- [16] JGJ 3—2010, 高层建筑混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
JGJ 3—2010, Technical specification for concrete structures of tall building [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [17] 高亮, 薛建阳, 汪锦林. 型钢再生混凝土框架-再生砌块填充墙结构恢复力模型试验研究[J]. *工程力学*, 2016, 33(9): 85—93.
Gao Liang, Xue Jianyang, Wang Jinlin. Experimental study on the restoring force model of steel reinforced recycled concrete frame infilled with recycled concrete blocks [J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 33(9): 85—93. (in Chinese)
- [18] 彭娟, 李碧雄, 邓建辉. 芦山地震和汶川地震中空心砖填充墙震害反思[J]. *世界地震工程*, 2014, 30(2): 186—193.
Peng Juan, Li Bixiong, Deng Jianhui. Rethink of damage to hollow-brick infill walls during Lushan earthquake and Wenchuan earthquake [J]. *World Earthquake Engineering*, 2014, 30(2): 186—193. (in Chinese)
- [19] GB 50011—2010, 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
GB 50011—2010, Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [20] 徐春一, 逯彪, 余希. 玻纤格栅配筋砌块墙体抗震性能试验研究[J]. *工程力学*, 2018, 35(增刊): 126—133.
Xu Chunyi, Lu Biao, Yu Xi. Experimental study on the seismic behavior of masonry wall with fiberglass geogrid [J]. *Engineering Mechanics*, 2018, 35(Suppl): 126—133. (in Chinese)

(上接第 113 页)

- [11] 时旭东, 钱磊, 马驰, 等. 经历常温降至 -196°C 再回温混凝土温度场试验研究[J]. *工程力学*, 2018, 35(5): 162—169.
Shi Xudong, Qian Lei, Ma Chi, et al. Experimental study on temperature field of concrete during cooling from Room temperature to -196°C and then returning to Room temperature [J]. *Engineering Mechanics*, 2018, 35(5): 162—169. (in Chinese)
- [12] 李俊林. 不同低温温度区间混凝土冻融循环作用性能试验研究[D]. 北京: 清华大学, 2017.
Li Junlin. Experimental study on concrete performance undergoing freeze-thaw cycles with different cryogenic temperature ranges [D]. Beijing: Tsinghua University, 2017. (in Chinese)