

辽河口海冰压缩强度基本特性分析

于哲敏¹ 张大勇² 王国军¹ 岳前进² 罗成喜³ 余报楚¹

(1. 大连海洋大学土木与海洋工程学院 辽宁 大连 116023;

2. 大连理工大学海洋科学与技术学院 辽宁 盘锦 116023; 3. 中南勘测设计研究院有限公司 湖南 长沙 410014)

摘要: 海冰的压缩强度是海冰最主要的力学特性. 针对辽河口附近海域海冰的压缩强度指标, 2014~2015年冬季于辽河口附近采样并进行室内测试. 内容包括单轴压缩强度实验、侧限压缩强度实验、变尺寸压缩强度测试. 实验表明辽河口海冰压缩强度受应变速率、卤水体积影响显著. 侧限压缩实验要比单轴压缩实验所得结果略大. 不同高宽比的试样在相同应变速率的前提下压缩强度变化不明显, 尺寸影响不显著.

关键词: 海洋工程; 海冰; 压缩强度; 侧限压缩; 尺寸效应; 辽河口

DOI: 10.3969/J. ISSN. 2095-4972. 2017. 01. 015

中图分类号: P75

文献标识码: A

文章编号: 2095-4972(2017)01-0119-06

在寒区的海洋资源开发以及港口建设中, 海冰是结构物的控制荷载. 海冰灾害对港口码头及近海工程会产生严重的影响. 海冰与结构物相互作用发生最多的破坏形式为挤压破坏. 同时, 由于海冰材料为脆性材料, 主要承受压力, 所以, 挤压破坏是产生最大冰荷载的破坏形式. 在海冰的各项力学性能中, 海冰的压缩强度是重要的力学指标. 海冰压缩强度受到海冰温度、盐度、孔隙率、实验加载速率等多种因素的影响.

从上世纪八十年代开始, 国内外各学者针对海冰的压缩强度已经做过大量的研究, 得出了许多重要的结论. Sinha(1984)就当年冰以及多年冰的实验研究表明海冰材料具有应力速率敏感性^[1]. Timco等(1990、1984)分别在应力率为 $2 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 以及 $1.2 \times 10^{-5} \sim 2.8 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 范围内, 采用平方关系描述不同应力率下的海冰单轴压缩强度, 并最早给出了海冰单轴压缩强度的计算公式^[2-3], 即用应力率的指数形式以及卤水体积的平方根关系联合描述海冰的单轴压缩强度. 国内学者李福成等(1986)研究表明随着应变速率的增加, 海冰从韧性破坏转变为脆性破坏^[4]. 岳前进等(2005)通过海冰的单轴压缩实验证明了海冰具有明显的韧

脆转变特性, 并利用弹塑性方法通过观测裂纹及翼纹长度对韧脆转变的应变速率进行了一般性的预测^[5]. 王庆凯等(2014)在2013~2014年冬季对辽河口的海冰物理力学特性进行了研究, 但只对海冰的单轴压缩强度及其相关参数进行了分析, 并没有对变尺寸海冰试样的单轴压缩强度、受侧向力情况下的海冰压缩强度进行分析^[6].

由于辽河口附近海域有辽河水注入, 是辽河的入海口. 海域海水盐度受到河水的影响较大, 冬季所形成的海冰相对其他近岸海域较为复杂. 同时, 辽河口与葫芦岛一个位于辽东湾东岸, 一个位于辽东湾西岸, 基本位于同一纬度, 并且, 在两个地点连线的中间有多个海上油气平台. 在冬季, 受不同风向以及海流的影响, 两处的近岸海冰容易漂流至海上平台附近, 对平台生产造成影响. 以往对于西岸的海冰研究较多, 东岸辽河口附近的海冰研究数据较为匮乏.

基于此, 本研究在2014~2015年冬季, 对辽河口附近的海冰的单轴压缩强度及侧限压缩强度进行了实验, 单独分析了各项参数对海冰压缩强度的影响, 并建立了加载速率、卤水体积与海冰压缩强度的多元回归模型, 得出了相应的结论, 为进一步了解辽河口附近海域的海冰压缩特性提供了参考依据.

收稿日期: 2015-12-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51309046); 国家海洋公益行业专项资助项目(201505019); 中国电力建设集团有限公司科技专项资助项目(SD2013-11); 大连理工大学基本科研业务费专项资助项目[DUT15RC(3)047]

作者简介: 于哲敏(1988~), 男, 硕士; E-mail: yuzheminch@126.com

通讯作者: 张大勇(1978~), 男, 副教授, 博士; E-mail: zhangdayong_2001@163.com

1 材料与方法

1.1 实验材料

2014 ~ 2015 年冬季对辽河口附近海域进行海冰调查并进行采样. 由于辽河口附近海域海水成分受辽河影响, 水文条件复杂, 同时在结冰过程中受到气候条件影响, 冰晶的形成有很大的不规律性, 需要选择平整且通透的海冰进行采集. 同时, 要确保原始冰坯有较少的含沙量. 由于目前并没有针对海冰实验的统一标准, 本研究主要参考 1988 年国际水利工程师协会(IAHR) 冰工程会议上提出的实验推荐方法以及国家海洋环境监测中心多年的冬季海冰物理力学实验方法.

由于现场采集冰样为大块冰坯, 在运输过程中极易在冰坯内部产生裂纹, 对后续实验产生影响, 所以在整个运输过程中都要对原始冰坯进行特殊保护处理, 尽量保证冰样的原始性.

冰坯采样完毕后, 运输至实验室内首先采用电动台锯对大块冰坯进行粗加工, 对于粗加工完毕的试样, 根据预先选定的尺寸进行细加工, 确保试件的线性以及各面的平整度. 本次选取试样尺寸为 70 mm × 70 mm × 145 mm, 加工好的试样统一放于低温柜内储存. 针对本次海冰试样实验的基本特性统计, 见表 1.

表 1 试样的基本统计特性

Tab.1 Basic characteristics of ice specimen

基本特性	均值	实验组数
海冰盐度	4.024	74
海冰温度/℃	-4.36	74
海冰密度/kg · m ⁻³	0.898	74
侧限压缩强度/Mpa	4.20	20
单轴压缩强度/Mpa	3.71	54

由于各个海域的海冰运动速度、海域温度等参数差异很大, 无法进行全方面的横向对比, 针对海冰物理参数中的盐度、密度进行了横向对比(表 2). 可以看出除了莱州湾海域的盐度明显偏小之外, 环渤海湾一带海域海冰盐度几乎相差不大. 原因可能是由于莱州湾受黄河水注入的影响.

1.2 海冰压缩实验方法

由于压缩实验试样上下两端部需接触加载端, 因此加工过程中需严格控制试样两端的平整性. 实验采用定制的海冰压力实验机, 最大加载力为 50 KN, 通过调节加载速度对试样进行实验, 通过传感器采集试样所受压力.

表 2 渤海沿岸海冰物理性质

Tab.2 Physical properties of sea ice along the coast of Bohai Sea

区域	盐度	密度/kg · m ⁻³
辽河口	4.0	0.898
鲅鱼圈	3.7	0.964
兴城	4.2	0.874
瓦房店	3.6	0.929
莱州湾	2.3	0.897
长兴岛	4.1	0.950

单轴压缩实验时, 试样两端部在加载时设有垫块, 加载方式见图 1. 一方面避免因试件加工误差导致的端部摩擦对试样抗压强度的影响, 另一方面确保试样在加工过程中受力的均匀性. 本实验选取橡胶块作为端部垫块, 考虑到冰与结构的相互作用方式, 实验采用垂直冰晶生长方向进行加载.



图 1 单轴压缩实验加载示意

Fig.1 General view of uniaxial compress test

侧限压缩实验时, 除了按照上述单轴压缩实验所采用的方法外, 为了模拟平整海冰相互作用时所受的侧向挤压力, 需要在试样两端固定金属板进行限位(图 2).

试样在实验前需在恒温柜中进行保温 24 h, 确保试样整体的温度分布均匀. 试样装夹完成后立刻对试样进行温度测量, 一次实验完成后对试样进行随机局部采样, 测量本次试样的盐度数据. 单轴压缩实验典型的应力-时间曲线见图 3, 海冰试样温度为 -4.3℃, 在加载速率为 13.5 mm/min 的条件下所测得试样的单轴压缩强度为 4.6 Mpa. 侧限压缩实验典型的应力-时间曲线见图 4, 海冰试样温度为 -4.3℃, 在加载速率为 13 mm/min 的条件下所测得试样的单轴压缩强度为 5.5 Mpa.

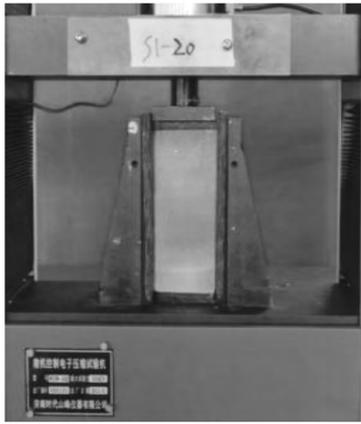


图2 侧限压缩实验加载示意
Fig.2 General view of confined compress test

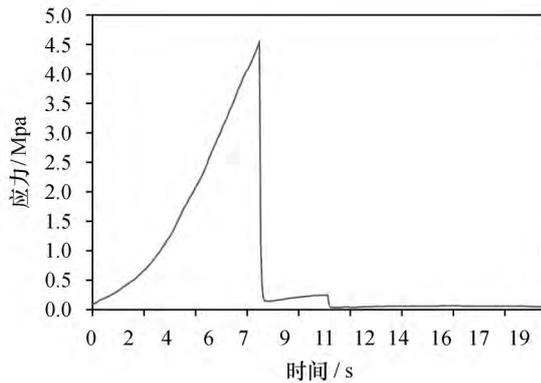


图3 单轴压缩实验典型时程曲线
Fig.3 Typical time series curve of uniaxial compress test

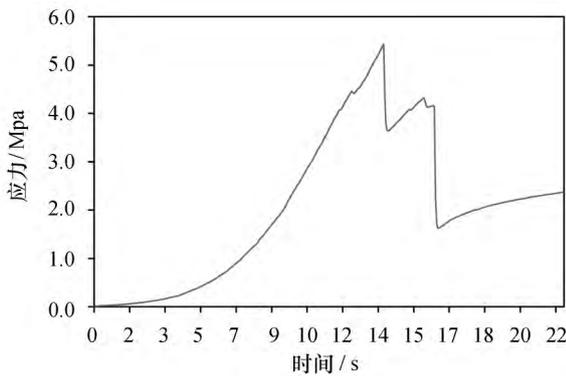


图4 侧限压缩实验典型时程曲线
Fig.4 Typical time series curve of confined compress test

1.3 不同试样尺寸的压缩实验

由于实验过程中采用试样为统一尺寸,为了判断不同尺寸试样对实验结果的影响,在保证试样截面积,其他加载参数相同的条件下对采用不同高度的试样进行了压缩实验,对于高宽比在 1.9~2.9 之间,截面尺寸相同(均为边长为 70 mm 的正方形)试样,每隔 0.1 选取 2 个试样,共选取 20 组不同高宽

比试样进行实验.实验操作及加载方法与上述单轴压缩实验相同(图 5).

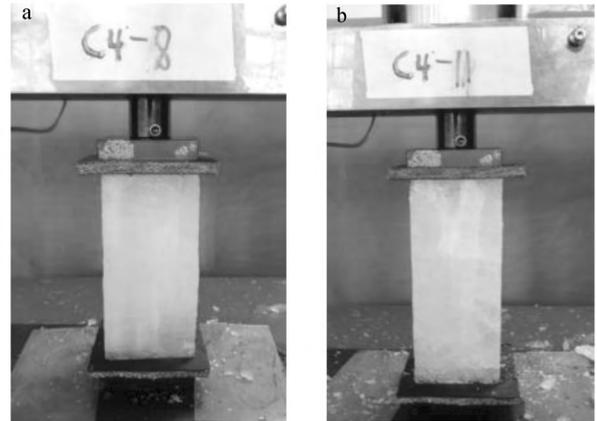


图5 变尺寸压缩实验结果
Fig.5 Strength test of ice specimens with different dimensions
a. 高度为 160 mm 的试样 b. 高度为 175 mm 的试样

2 结果与分析

本研究主要考虑海冰各项参数对其单轴压缩强度的影响,侧限压缩实验的引入用于判断侧限力对海冰试样单轴压缩强度的影响程度,变尺寸下的实验用于判断试件尺寸对海冰单轴压缩强度的影响程度.

利用单轴压缩实验所得结果,对各试样的压缩强度值进行统计分析,发现试样单轴压缩强度可能为正态分布.进一步分析,压缩强度的结果分布通过了显著性水平为 $\alpha = 0.05$ 的 Shapiro-Wilk 检验,其均值为 $\mu = 3.97$,方差为 $\sigma = 0.79$,海冰单轴压缩强度的分布直方图见图 6.

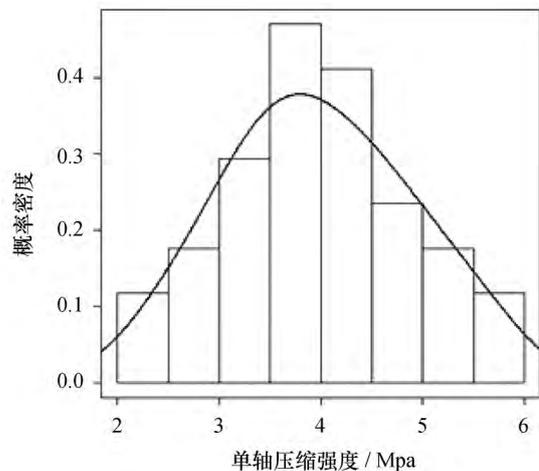


图6 海冰压缩强度分布
Fig.6 Distribution of sea ice uniaxial compression strength

2.1 海冰单轴压缩强度的单影响因素分析

在寒区海洋工程中,冰与结构物相互作用的最主要破坏形式是压缩破坏,因此海冰的单轴压缩强度为海冰最重要的力学性质.海冰的单轴压缩强度受到温度、盐度、加载速率的影响,温度、盐度参数可以用卤水体积进行总体描述. Frankenstein 等(1967)通过研究温度范围处于 $-22.9 \sim -0.5^{\circ}\text{C}$ 的海冰,给出了海冰温度、盐度与海冰卤水体积的函数关系^[7],即:

$$v_b = S \times \left(0.532 + \frac{49.185}{|T|} \right), \quad (-22.9^{\circ}\text{C} \leq T \leq -0.5^{\circ}\text{C}) \quad (1)$$

式(1)中 v_b 为海冰卤水体积, T 为海冰温度($^{\circ}\text{C}$), S 为海冰盐度.

另外,为了得到稳定的实验结果证明加载速率对海冰单轴压缩强度的影响,实验中采用名义应变速率,即:

$$\varepsilon = \frac{V_{\text{loading}}}{L} \quad (2)$$

式(2)中 ε 为应变速率(s^{-1}), L 为试样高度(mm), V_{loading} 为实验加载速率(mm/s).

由此,影响海冰压缩强度的因素变为卤水体积和应变速率.

本次实验通过选取 $-15 \sim -5^{\circ}\text{C}$ 的实验数据,将温度、盐度与卤水体积函数化可将温度、盐度对海冰压缩强度的影响统一为卤水体积的影响.选取应变速率为 10^{-3} 的试样,分析卤水体积平方根与海冰压缩强度的关系见图7.

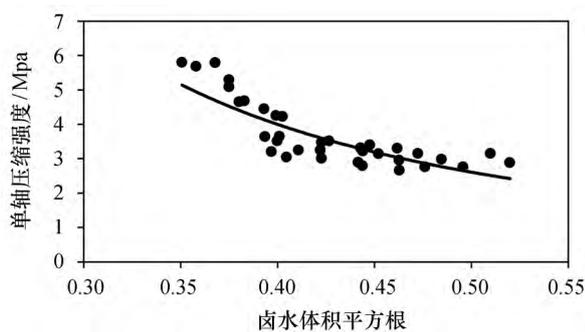


图7 卤水体积对海冰单轴压缩强度的影响
Fig. 7 Influence of brine volume on the uniaxial compression strength of sea ice

虽然单轴压缩强度的分布有着较大的离散性,但可以看出,随着卤水体积的增大,海冰单轴压缩强度有明显的下降趋势.对上述数据进行幂函数曲线拟合有:

$$\sigma_c = 0.691\sqrt{v_b}^{-1.91} \quad (3)$$

该拟合曲线相关系数平方 $R^2 = 0.70$.

选择卤水体积平方根为 $0.40 \sim 0.45$ 范围内的实验数据,分析加载速率对海冰单轴压缩强度的影响见图8.

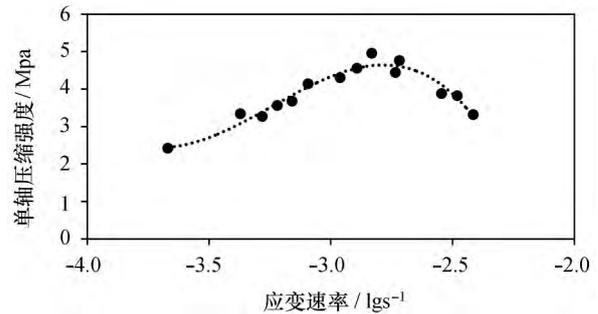


图8 应变速率对海冰单轴压缩强度的影响
Fig. 8 Influence of strain rate on the uniaxial compression strength of sea ice

海冰的单轴压缩强度是海冰与结构相互作用的重要力学参数,研究不同加载速率下的海冰单轴压缩强度有利于分析不同冰速下冰与结构相互作用产生的荷载.王安良等(2014)采用线性关系描述海冰单轴压缩强度与加载速率的关系^[8],但海冰的单轴压缩强度都有明显的韧脆转变区域^[4-5],在低加载速率下压缩强度较低,随着加载速率的增大压缩强度有着明显的增大,但当加载速率增大到一定程度时,压缩强度会随之降低^[9].所以针对上述数据,本文采用三次曲线拟合的方法有:

$$\sigma_c = -5.81\varepsilon^3 - 56.48\varepsilon^2 - 179.32\varepsilon - 182.25 \quad (4)$$

该式的拟合相关系数平方 $R^2 = 0.94$,可见三次曲线可以较好的描述海冰单轴压缩强度随着加载速率先增大后减小的变化趋势.

针对海冰卤水体积、加载速率的单变量研究表明海冰在不同卤水体积以及不同加载速率下压缩强度都受到明显的影响,是影响海冰压缩强度的重要因素.

2.2 海冰侧限压缩实验结果分析

借助海冰单轴压缩实验结果,进行海冰侧限压缩以及尺寸效应实验,并分别与海冰单轴压缩强度的实验结果进行对比,分析在有侧限约束条件下的海冰压缩强度变化以及不同尺寸的试样对实验结果的影响.

在实际情况中,往往会出现大面积的平整冰与结构相互作用的情况,海冰局部单元体的破坏与周围冰场密切相关,海冰单元体处于受侧限约束的状态^[10].对于尺寸相同的试样,在加载速率保持在 10^{-3}s^{-1} 侧

限压缩预加侧限应力为 0.1 Mpa 的情况下,海冰的单轴压缩强度与侧限压缩强度对比见图 9。

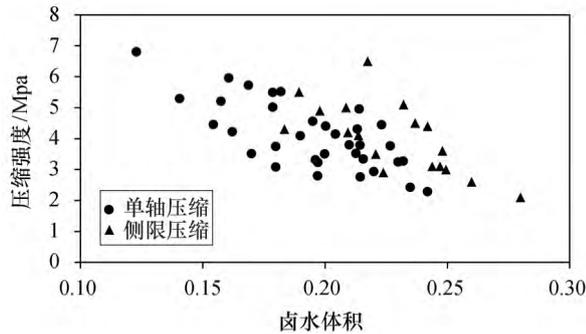


图 9 海冰的单轴压缩强度与侧限压缩强度对比
Fig. 9 Comparison of uniaxial compression strength and confined compression strength

海冰材料在单轴压缩时由于材料两侧不受约束,试样在受压时不仅产生纵向变形,同时产生横向变形^[11-12]。侧限压缩实验由于在试样两侧进行了限制,试样无法产生横向变形。从上述实验结果可以看出,基本上海冰的侧限压缩强度要大于海冰的单轴压缩强度,但个别试样的侧限压缩强度甚至要低于同等条件下的单轴压缩强度,可能是由于海冰材料内部晶体排列的不确定性所导致。

2.3 海冰试样尺寸效应实验结果与分析

实验中均采用了尺寸为 70 mm × 70 mm × 145 mm 的实验样本。为了研究尺寸效应对海冰强度的影响,制作了不同高宽比的试样。由于无法精确控制试样卤水体积,选取卤水体积在 0.20 ~ 0.25 范围内的试样,认为卤水体积变化不大。加载速率保持在 10^{-3} s^{-1} , 温度在 -10°C 左右,对试样进行单轴压缩实验,获得不同高宽比下的试样压缩强度见图 10。

针对 19 组试样进行实验所得压缩强度平均值为 3.79, 标准差为 0.85, 回归方程斜率为 0.24, 大部分点均匀分布于回归线两侧。可以表明,在所测试的高宽比变化范围内,试样的压缩强度并无明显的变化。

3 结论

由于海冰材料的天然属性,针对海冰材料的各

项研究都要考虑具体海域,辽河口海域由于受到辽河河水的影响,海冰各项参数及力学性质并不明确^[13]。本研究根据 2014 ~ 2015 年度在辽河口附近海域的海冰样本,对辽河口区域的海冰的力学性质进行了分析,结论如下:

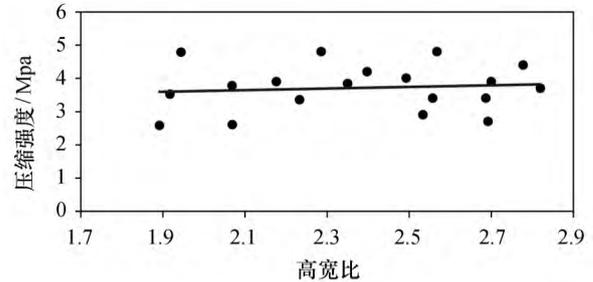


图 10 高宽比对海冰压缩强度的影响
Fig. 10 Influence of height-width ratio on the uniaxial compression strength of sea ice

(1) 辽河口区域本次实验海冰平均单轴压缩强度为 3.71 Mpa, 平均侧限压缩强度为 4.20 Mpa, 可作为辽河口区域近海洋及港口工程建设的海冰环境参考。

(2) 随着卤水体积的增大海冰压缩强度明显下降,海冰单轴压缩强度与卤水体积的平方呈负幂函数关系。

(3) 加载速率对海冰的影响表现为:随着加载速率的增大,海冰单轴压缩强度先增大后减小,有明显的韧脆转变过程。

(4) 海冰单元体在受到侧限力的作用下压缩强度要略大于单轴压缩强度;在试样高宽比变化不大的情况下,尺寸效应对试样压缩强度的影响不明显。

致谢:在辽河口海冰压缩强度的实验及分析中得到了大连理工大学盘锦校区岳前进教授、张大勇教授的指导及帮助;此外郭龙玮、杨耀鹏、蔡玉良、于帅帅、李晓晓、王国军、尹原超也参与了室外取冰以及室内实验等相关工作,在此对上述人员表示感谢。

参考文献:

- [1] Sinha N K. Uniaxial compressive strength of first-year and multi-year sea ice [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1984, 11(1): 82-91.
- [2] Timco G W, Frederking R M W. Compressive strength of sea ice sheets [J]. Cold Regions Science and Technology, 1990, 17(3): 227-240.
- [3] Timco G W, Frederking R M W. A procedure to account for machine stiffness in uni-axial compression tests [J]. Iahr International Symposium on Ice Proceedings, 1984, 1: 39-47.

- [4] 李福成, 孟广琳, 张明元. 应力率对海冰单轴抗压强度的影响[J]. 海洋学报, 1986, 8(5): 619-625.
- [5] 岳前进, 任晓辉, 陈巨斌. 海冰韧脆转变实验与机理研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2005, 13(1): 35-42.
- [6] 王庆凯, 卢燕, 郭可彩, 等. 辽河口附近海冰单轴压缩强度的试验与统计特征[J]. 数学的实践与认识, 2014, 44(24): 157-162.
- [7] Frankenstein G, Garner R. Equations for determining the brine volume of sea ice from -0.5°C to -22.9°C [J]. Journal of Glaciology, 1967, 6(6): 943-944.
- [8] 王安良, 许宁, 季顺迎. 渤海沿岸海冰单轴压缩强度的基本特性分析[J]. 海洋工程, 2014, 32(4): 82-88.
- [9] 李志军, 孟广琳, 隋吉学. 辽东湾海冰单轴压缩长期强度的初步分析[J]. 海洋学报, 1991, 13(4): 571-575.
- [10] 季顺迎, 王安良, 刘宏亮. 渤海海冰侧限压缩强度的影响因素分析[J]. 海洋通报, 2014, 33(4): 371-376.
- [11] Weiss J, Schulson E M. The failure of fresh-water granular ice under multiaxial compressive loading[J]. Acta Metallurgica et Materialia, 1995, 43(6): 2 303-2 315.
- [12] 李志军, 王永学. 渤海海冰工程设计特征参数[J]. 海洋工程, 2000, 18(1): 61-69.
- [13] 白珊, 刘钦政. 渤海的海冰[J]. 海洋预报, 1999, 16(3): 1-9.

Characteristics of sea ice compressive strength in Liaohe Estuary

YU Zhe-min¹, ZHANG Da-yong², WANG Guo-jun¹, YUE Qian-jin², LUO Cheng-xi³, YU Bao-chu¹

(1. College of Ocean and Civil Engineering, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China;

2. School of Ocean Science & Technology, Dalian University of Technology, Panjin 116023, China;

3. Central Southern Geotechnical Design Institute Co., Ltd, Changsha 410014, China)

Abstract: The compressive strength is one of important mechanical characteristics of sea ice. The compressive strength of sea ice is sampled and tested during the winter of 2014 ~2015 in Liaohe Estuary. The experiments conclude uniaxial compressive strength test, confined compressive strength test and uniaxial compressive strength test on the ice specimens from different dimensions. The experiment shows that the strength of sea ice is significantly affected by strain rate and brine volume. The confined compressive strength of ice is slightly larger than that of the uniaxial compressive strength. Under the same strain rate, the compressive strength of the sample is not different obviously and the size effect of the specimen is not important.

Key words: marine engineering; sea ice; compression strength; confined compression; size effect; Liaohe River Estuary

DOI: 10. 3969/J. ISSN. 2095-4972. 2017. 01. 015

(责任编辑: 肖 静)