



湖区桩基极限挤压冰力计算研究

杨晓松, 闫显亮, 张兵

(山东省交通规划设计院集团有限公司, 山东 济南 250101)

摘要: 现行 JTS 144-1—2010《港口工程荷载规范》提出了海冰和河冰的极限挤压冰力计算公式, 但是规范中没有针对大面积淡水湖区的计算公式。基于实际工程, 通过对比分析国内相关行业规范针对极限挤压冰力的计算公式, 并结合数值模型实验得出, 利用《港口工程荷载规范》的河冰公式计算得出的极限挤压冰力偏小, 而海冰公式计算得出的极限挤压冰力偏大, 根据现行 JTG D60—2015《公路桥涵设计通用规范》得出的极限挤压冰力与数学模型模拟值基本一致。因此对于大面积淡水湖区极限挤压冰力的计算可以参考《公路桥涵设计通用规范》中的计算公式。该研究为计算大面积淡水湖区极限挤压冰力提供一定的依据, 为修订规范时提供参考。

关键词: 海冰; 河冰; 淡水湖区; 极限挤压冰力

中图分类号: U652

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)11-0148-05

Calculation of ultimate extrusion ice force of pile foundation in lake area

YANG Xiaosong, YAN Xianliang, ZHANG Bing

(Shandong Provincial Communication Planning and Design Institute Group Co., Ltd., Jinan 250101, China)

Abstract: The current JTS 144-1—2010 Port Engineering Load Code puts forward the calculation formula for the ultimate extrusion ice force of sea ice and river ice, but there is no calculation formula for large freshwater lake area in the code. Based on practical projects, this paper makes a comparative analysis of the calculation formulas of the ultimate extrusion ice force in relevant domestic industry codes, and combines with numerical model experiments to conclude that the ultimate extrusion ice force calculated by using the river ice formula of *Port Engineering Load Code* is small, but by the sea ice formula is large. According to the current JTG D60—2015 *General Code for Design of Highway Bridges and Culverts*, the ultimate extrusion ice force is basically consistent with the simulated value of the mathematical model. Therefore, the calculation formula in *General Code for Design of Highway Bridges and Culverts* can be referred to for the calculation of the ultimate extrusion ice force in large freshwater lakes. This study provides a basis for the calculation of the limit ice extrusion force in large freshwater lakes, and provides a reference for the revision of specifications.

Keywords: sea ice; river ice; freshwater lake area; ultimate extrusion ice force

1 工程概况

1.1 工程位置

工程位于山东平原地区, 湖面面积约 209 km², 该湖相对封闭, 通过 1 座船闸与外界水域相连, 冬季湖区来水较小, 水位稳定, 平均水深约 4.5 m。因航道建设需要, 拟建设示位航标 1 座。

1.2 结构方案

示位航标基础采用灌注桩+现浇承台的结构形式, 桩基直径 0.6 m、长 20 m(其中入土深度约 15 m), 桩基呈正三角形布置, 桩基中心距 2.4 m, 承台为圆角三边形, 边长 3.8 m。通过分析得出, 航标桩基控制荷载为极限挤压冰荷载, 设计冰厚

收稿日期: 2023-02-22

作者简介: 杨晓松 (1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港口与航道工程规划、设计工作。

0.17 m, 根据现行 JTS 144-1—2010《港口工程荷载规范》, 按照河冰计算得出, 作用在灌注桩上的极限挤压冰力为 34.3 kN。基础计算按照墩柱考虑, 经计算, 桩基的承载能力及桩基混凝土裂缝宽度均满足规范要求。示位航标基础结构见图 1。

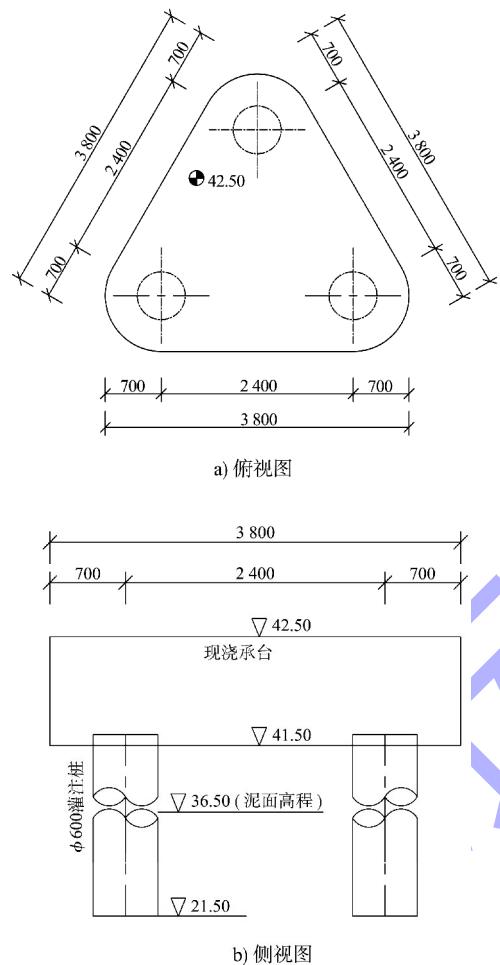


图 1 示位航标结构 (高程: m; 尺寸: mm)

1.3 桩基破坏情况

工程于当年 11 月底完工, 12 月湖区结冰冰封, 次年 2 月湖区解冻, 在对示位航标检查的过程中发现 3 根桩基均被折断, 桩基及承台沉入湖中, 水下勘查发现桩基在泥面以下约 1 m 处发生折断。

2 桩基折断原因分析

初步分析桩基发生断桩是由于极限挤压冰力实际值超过原设计方案中采用的冰荷载值, 造成桩基承受的极限挤压冰力超过了桩基设计承载能

力极限值, 从而导致桩基折断, 航标沉入湖中。

为了进一步查明桩基折断原因, 开展了两个方面的工作: 一方面是对比国内相关规范中的极限挤压冰力计算公式; 另一方面是对湖区极限挤压冰力进行数学模型计算分析。

2.1 规范公式对比

目前计算极限挤压冰力的规范较多, 主要有: 现行水运行业规范 JTS 144-1—2010《港口工程荷载规范》(以下简称《港规 10 版》)、已过期水运行业规范 JTJ 215—98《港口工程荷载规范》(以下简称《港规 98 版》)、现行公路行业规范 JTG D60—2015《公路桥涵设计通用规范》(以下简称《公规 15 版》)、现行水利行业规范 SL 744—2016《水工建筑物荷载设计规范》(以下简称《水规 16 版》)等。

2.1.1 计算公式

1) 《港规 10 版》^[1] 中公式 12.0.3 为:

$$F_I = ImkBH\sigma_c \quad (1)$$

式中: F_I 为极限挤压冰力标准值, kN; I 为冰的局部挤压系数; m 为桩、墩迎冰面形状系数; k 为冰与桩、墩之间的接触条件系数; B 为桩、墩迎冰面投影宽度, m; H 为单层平整冰计算冰厚, m; σ_c 为冰的抗压强度标准值, kPa。

2) 《港规 98 版》^[2] 中公式 12.0.3 为:

$$F_I = mAbhR_y \quad (2)$$

式中: F_I 为极限挤压冰力标准值, kN; m 为桩、墩迎冰面形状系数; A 为冰温系数, 冰温 0 °C 时取 1.0, 冰温 -10 °C 时取 2.0, 其余温度直线内插; b 为桩、墩迎冰面投影宽度, m; h 为计算冰厚, m; R_y 为冰的抗压强度标准值, kPa。

3) 《公规 16 版》^[3] 中公式 4.3.11-1 为:

$$F_I = mC_tbtR_{ik} \quad (3)$$

式中: F_I 为冰压力标准值, kN; m 为桩、墩迎冰面形状系数; C_t 为冰温系数, 冰温按 0 °C 时取 1.0, 冰温按 -10 °C 及以下时取 2.0, 其余温度直线内插; b 为桩、墩迎冰面投影宽度, m; t 为计算冰厚, m; R_{ik} 为冰的抗压强度标准值, kPa。

4) 《水规 16 版》^[4] 中公式 11.2.2-1 为:

$$F_{i2} = mf_{ik}B\delta_i \quad (4)$$

$$\text{其中: } f_{ib} = k_b f_{ic} \quad (5)$$

式中: F_{i2} 为静冰压力标准值, kN。 m 为桩、墩前缘的平面形状系数; f_{ib} 为冰的抗压强度标准值, kPa, 应根据建筑物和冰温确定; k_b 为增强系数; f_{ic} 为冰的抗压强度标准值, kPa; B 为墩桩在冰作用高程上的前沿宽度, m; δ_i 为静冰厚度, m。

2.1.2 公式对比分析

1) 相同处。对比分析 4 个计算公式可知: m 、 B 、 H 3 个参数在 4 个公式中不变, 工程采用 $\phi 600$ mm 灌注桩, 根据规范, $m=0.9$ 、 $B=0.6$ m、 $H=0.17$ m。

2) 不同处。
①《港规 10 版》考虑了 I 、 k , 根据规范计算 $I=1.55$, $k=0.32$ 。针对 σ_c 的选用, 规范中给出了海冰和河冰两种情况: 规范中要求根据当地多年统计实测资料按照不同重现期取值; 无实测资料时海冰可按附录 K 中表 K.0.2 采用; 河道流冰开始时取 750 kPa, 最高流冰水位时取 450 kPa。同纬度地区的海冰 σ_c 约为河冰的 2.5 倍。
②《港规 98 版》考虑了 A 。针对 R_y 的选用: 规范中要求可取当地 0 ℃ 的冰抗压强度。无实测资料时海冰可取 750 kPa; 河道流冰开始时取 750 kPa, 最高流冰水位时取 450 kPa。
③《公规 15 版》与《港规 98 版》完全相同。
④《水规 16 版》考虑了 k_b , 该系数根据结构宽度 B 与冰厚 δ_i 的比值确定。本工程 $B=0.6$ m, $\delta_i=0.17$ m, $B/\delta_i \approx 3$, k_b 可取 2。针对 f_{ic} 的选用, 规范中要求 0 ℃ 时取 450 kPa, -3 ℃ 时取 750 kPa, -10 ℃ 时取 1 200 kPa。

2.1.3 计算结果对比

2.1.3.1 σ_c 的选用

《港规 10 版》(海冰)计算时根据地区和重现期按照附录 K 选用 σ_c 值, 本工程设计使用年限为 50 a, 计算取同纬度的威海地区 50 a 重现期 $\sigma_c=1 850$ kPa; 《港规 10 版》(河冰)计算时取 $\sigma_c=750$ kPa; 《港规 98 版》和《公规 15 版》计算时取 $\sigma_c=750$ kPa; 《水规 16 版》计算时 0 ℃ 时取 450 kPa, -3 ℃ 时取 750 kPa, -10 ℃ 时取 1 200 kPa。

2.1.3.2 计算结果

不同公式极限挤压冰力计算值见表 1。

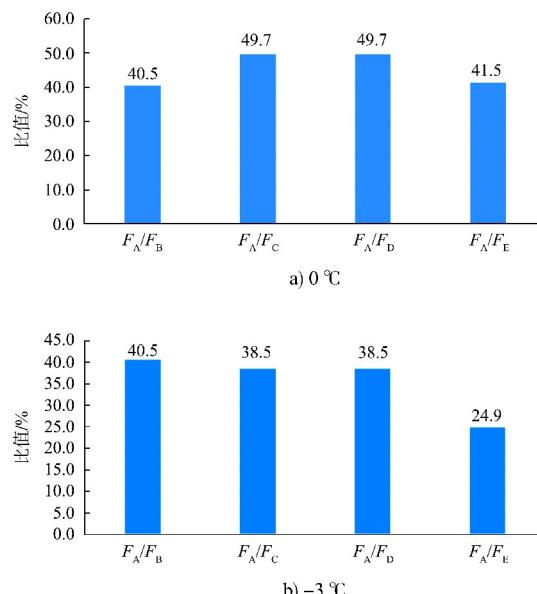
表 1 极限冰压力标准值计算结果

规范名称	计算 冰厚/m	温度/℃	冰压力 标准值/kN
《港规 10 版》	河冰	0.17	- 34.25
	海冰	0.17	84.48
《港规 98 版》	0.17	0	68.85
	0.17	-3	89.05
《公规 15 版》	0.17	-10	137.70
	0.17	0	68.85
《水规 16 版》	0.17	-3	89.05
	0.17	-10	137.70
	0.17	0	82.62
	0.17	-10	220.32

2.1.3.3 结果分析

为便于直观对比《港规 10 版》的计算值与表 1 中各计算值的差异, 分别对各计算结果进行编号: 其中《港规 10 版》(河冰)为 F_A , 《港规 10 版》(海冰)为 F_B , 《港规 98 版》为 F_C , 《公规 15 版》为 F_D , 《水规 16 版》为 F_E 。

1) 《港规 10 版》(河冰)与其他结果对比见图 2。由图可知: 《港规 10 版》(河冰)计算值最小。其值为《港规 10 版》(海冰)的 40.5%; 0 ℃ 时为其他规范的 41.5%~49.7%; -3 ℃ 时为其他规范的 24.9%~38.5%; -10 ℃ 时为其他规范的 15.5%~24.9%。



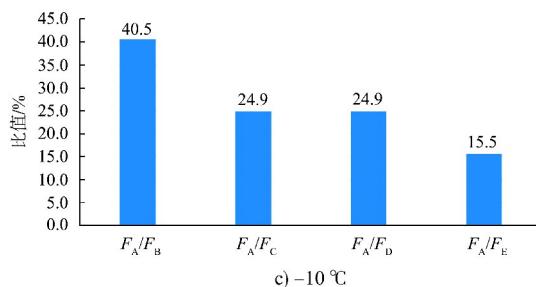


图 2 《港规 10 版》(河冰)与其他结果对比

2) 《港规 10 版》(海冰)与其他结果对比见图 3。由图可知:《港规 10 版》(海)计算值适中。其值为《港规 10 版》(河冰)的 246.7%; 0 ℃时为其他规范的 102.3%~122.7%; -3 ℃时为其他规范的 61.4%~94.9%; -10 ℃时为其他规范的 38.3%~61.4%。

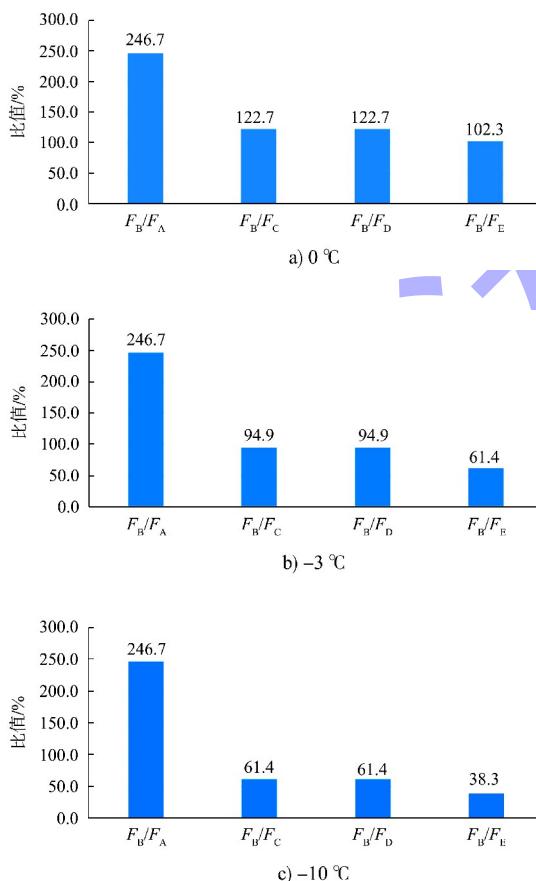


图 3 《港规 10 版》(海冰)与其他结果对比

3) 《港规 98 版》和《公规 15 版》计算值一致。

2.2 数学模型计算分析

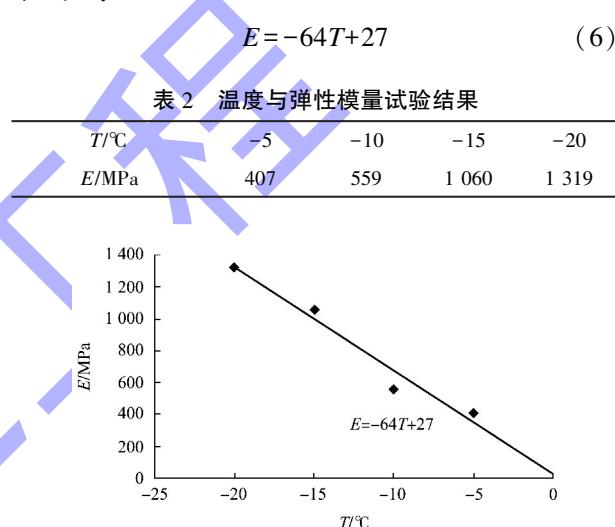
2.2.1 参数选定

高寒地区冬季水库进入封冻期后，其表面会

形成厚实的冰层，称为冰盖^[5]。当环境温度升高时，冰盖会自然膨胀，对四周约束形成作用力，称为冰的温度膨胀力，冰盖膨胀至挤碎时产生的最大作用力就是极限挤压冰力。

1) 冰压力的选定。本次模拟冰温取 0 ℃，冰的抗压强度标准值取 750 kPa。

2) 冰弹性模量选定。单仁亮等^[6]对淡水冰三轴压缩力学特性试验研究结果见表 2，通过数值拟合可得出冰弹性模量与温度的关系(图 4)，从而推导出淡水冰弹性模量 E 与温度 T 的关系式^[7]:

图 4 $E-T$ 的关系

2.2.2 数学模型计算

2.2.2.1 冰盖-桩基相互作用模型

本文以 $\phi 600$ mm 灌注桩作为研究对象，建一个横截面直径 0.6 m 的桩基，采用删除单元的方法模拟冰的失效开裂，使用有限元程序对冰材料失效开裂特性进行模拟，通过重新定义单点处的场变量实现材料失效的模拟，计算模型采用六面八节点线性等参数单元进行离散。本工程设计冰厚较薄，假定冰层温度一致，冰盖挤碎过程中桩基不产生位移，桩基上下两端固定约束，在冰盖一侧施加水平位移，使桩基与冰盖之间发生相互作用。假定冰盖与桩基之间法向受压，不考虑受拉和受剪作用。建立三维数学计算模型见图 5。

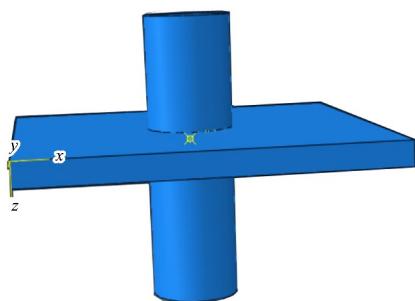


图 5 冰盖-桩基相互作用计算模型

2.2.2.2 冰盖-桩基相互作用模拟结果

根据冰盖-桩基相互作用模型得出的冰极限挤压应力云图见图 6。随着施加位移的增加，桩基前冰盖逐渐受压发生变形，冰压力逐渐增加，变形增加到一定程度，桩基前的冰盖最终受拉开裂，冰压力达到最大。位移继续增加，冰盖逐渐破碎，单元被删除，冰压力逐渐降低。冰压力-位移曲线见图 7，根据冰压力-位移曲线得出冰压力最大值为 71.3 kN。

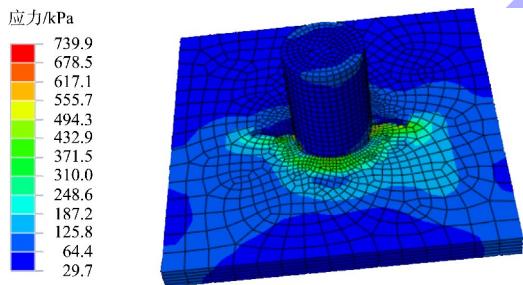


图 6 冰极限挤压应力云图

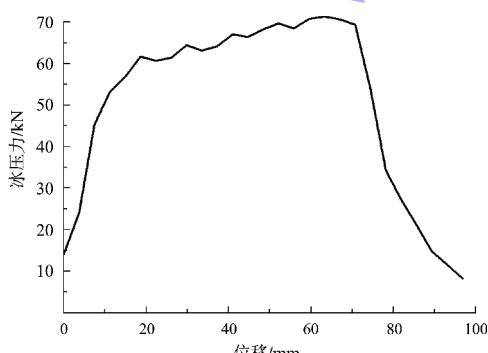


图 7 冰压力-位移曲线

2.3 规范计算与数学模型计算结果对比分析

冰温 0 ℃时，本工程极限挤压冰力计算值见表 3。不同计算结果与数学模型计算结果 F 数对比见图 8。由表 3 和图 8 可知：1)《港规 10 版》(河冰)

计算得出的冰压力不及数学模型计算结果的 1/2。

2)《港规 10 版》(海冰)计算得出的冰压力约为数学模型计算结果的 1.2 倍。3)《港规 98 版》和《公规 15 版》计算得出的冰压力与数学模型计算结果相差不大。4)《水规 16 版》计算得出的冰压力为数学模型计算结果的 1.15 倍。

表 3 极限冰压力标准值计算结果 kN

F_A	F_B	F_C	F_D	F_E	F 数
34.25	84.48	68.85	68.85	82.62	71.30

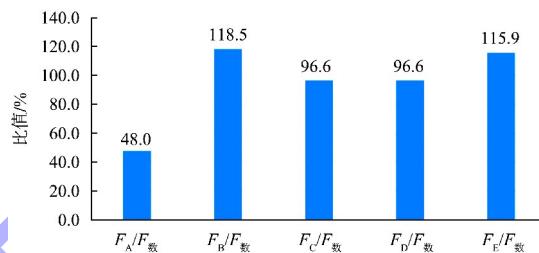


图 8 其他计算结果与数学模型计算结果对比

2.4 桩基折断原因

原设计根据《港规 10 版》(河冰)中公式计算得出作用在 $\phi 600$ mm 灌注桩的极限挤压冰力为 34.3 kN，桩基最大弯矩设计值为 448 kN·m，设计配 HRB400 $\phi 25$ mm 型钢筋 15 根，桩基设计弯矩为 506 kN·m。根据《公规 15 版》中公式计算得出作用在 $\phi 600$ mm 灌注桩的极限挤压冰力为 68.85 kN，桩基最大弯矩设计值为 901 kN·m，而原设计桩基弯矩为 506 kN·m，桩基抗弯能力严重不足，最终导致桩基发生折断。

3 变更方案及运营情况

3.1 变更方案

桩基折断原因确定后，对原设计方案进行了优化，桩基采用 $\phi 1000$ mm 钢管桩 (Q235B)，根据《公规 15 版》中公式计算得出，作用在 $\phi 1000$ mm 钢管桩的极限挤压冰力为 114.75 kN，桩基最大弯矩设计值为 2060 kN·m，钢管桩最大拉应力为 132 MPa，最大压应力为 101 MPa，承台最大位移为 5.6 mm，桩基抗拉、抗压强度设计值为 215 MPa。

(下转第 217 页)