

贾彦兵. 北方沿海风电工程多桩承台混凝土冻融环境下的耐久性研究[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(12): 78-84.

北方沿海风电工程多桩承台混凝土冻融环境下的耐久性研究

贾彦兵

(龙源电力集团股份有限公司, 北京 100034)

摘要:针对我国北方浅海地区风电工程多桩承台所耐受环境,通过模拟海洋工况,如冻融循环、氯盐溶液浸泡,并在此模拟环境作用基础上进行抗压强度试验和抗折强度试验,再结合钢筋粘结的拔出试验,探讨不同混凝土强度等级在氯盐侵蚀的情况下,分别进行不同次数的冻融循环,来对比分析各种工况对混凝土物理性能的影响。运用超声波探测技术有效地解释混凝土在冻融循环和氯离子复合作用下强度降低的劣化机理。最后,利用有限元数值模拟多桩承台的作业环境,再一次验证了冻融循环对风机承台混凝土结构的影响规律。此研究可为北方海域冻融环境较为恶劣区域的风电项目建设提供有益参考。

关键词:抗冻性; 风电基础; 超声测试; 数值模拟

中图分类号: TU528; TU37 文献标识码: A DOI: 10.16028/j.1009-2722.2020.130

0 引言

我国北方浅海地区,地层多由第四系全新统海陆交相互沉积物组成,部分地区存在空隙潜水,承载力低且厚度分布不均匀。根据我国江浙区域海上风电开发经验,多采用单桩或群桩基础,考虑到北方区域复杂的地质环境,以及群桩基础在北方地区应用普遍较多,且工艺成熟,对于冰凌等特有灾害比单桩基础有更好的效果,因此,群桩基础是该区域海上风电的重要基础方式。由于我国北方环渤海区域普通混凝土普遍使用寿命只有 20~30 年,远达不到 50 年以上的使用寿命标准^[1]。因此,本文对群桩基础的混凝土承台的耐久性进行试验分析和数值模拟计算,为北方海域受氯盐侵蚀结合冻融的运行环境区域风电项目建设提供有益参考。

本文通过对比在 NaCl 溶液浸泡后,经过由少到多不同的冻融循环次数,3 种常用港工混凝土性能的变化规律,并通过超声波探测技术探究混凝土的劣化机理^[2-3],最后通过数值模拟验证相关结论。

收稿日期: 2020-09-16

作者简介: 贾彦兵(1967—),男,硕士,高级工程师,主要从事工程管理工作。E-mail: wml7wm@163.com

1 模拟海洋环境试验准备

1.1 试验方法

根据北方海上风电工程的特点,选用 C30、C40、C50 3 种不同抗压强度的混凝土试件。试验中采用 P.O42.5 普通硅酸盐水泥,骨料采用细度模数为 2.43 河砂和粒径为 5~25 mm 的级配碎石;选用普通自来水,选用聚羧酸高性能减水剂,并加入引气剂,具体配合比参数见表 1。每个强度等级分别 7 组标准混凝土立方体试块进行抗压试验和超声探测,混凝土试件尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm;每个强度等级分别 7 组混凝土棱柱体试块抗折试验和动弹模量测定,混凝土试件尺寸为 100 mm×100 mm×400 mm 棱柱试块。所有混凝土试件制作完成,待 24 h 后进行拆模,在标准养护室养护 28 d 后,将试件放入到 10% 的 NaCl 溶液中浸泡 90 d 后将试件取出,放置在快速冻融试验箱,按照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009)中的抗冻性能试验的“快冻法”进行冻融试验^[4]。每个强度等级的 2 组试块分别在完成冻融循环 150、200、250、300、350、400 次后,先使用非金属

超声检测仪检测混凝土损伤层厚度大小^[5], 再进行抗压、抗折试验, 最后转换成标准试块强度进行对比。

表 1 混凝土配合比
Table 1 Concrete mixture design

| 编号 | 水泥 | 水 | 砂子 | 粗骨料 | 减水剂 | 引气剂 |
|-----|-----|-----|-----|------|------|------|
| C30 | 355 | 149 | 759 | 1187 | 3.55 | 3.55 |
| C40 | 427 | 150 | 712 | 1161 | 5.13 | 4.27 |
| C50 | 478 | 153 | 691 | 1128 | 5.74 | 4.78 |

1.2 标准强度试验

制备的试块在标准养护 28 d 后, 取 1 组标准立方体试块和 1 组棱柱体试块分别进行混凝土强度

检测试验和弹模量测定, 测得 C30、C40、C50 抗压强度分别为 33.9、44.7、54.6 MPa, 抗折强度分别为 6.5、8.4、10.3 MPa, 弹性模量分别为 29 680、32 400、34 900 MPa。此试验数据用于与模拟海洋环境测试结果进行参照对比分析。

1.3 超声波探测试验分析

为获知北方海洋环境对混凝土承台随时间的影 响深度规律, 取每种强度等级 6 组不同冻融循环立方体试块, 采用超声平测法对不同冻融循环下受 NaCl 溶液的侵蚀的试件进行测试, 分析各测点时-距关系, 选择 6 种典型的 不同冻融循环次数下的测试数据, 绘制各测点时-距关系曲线(图 1)。

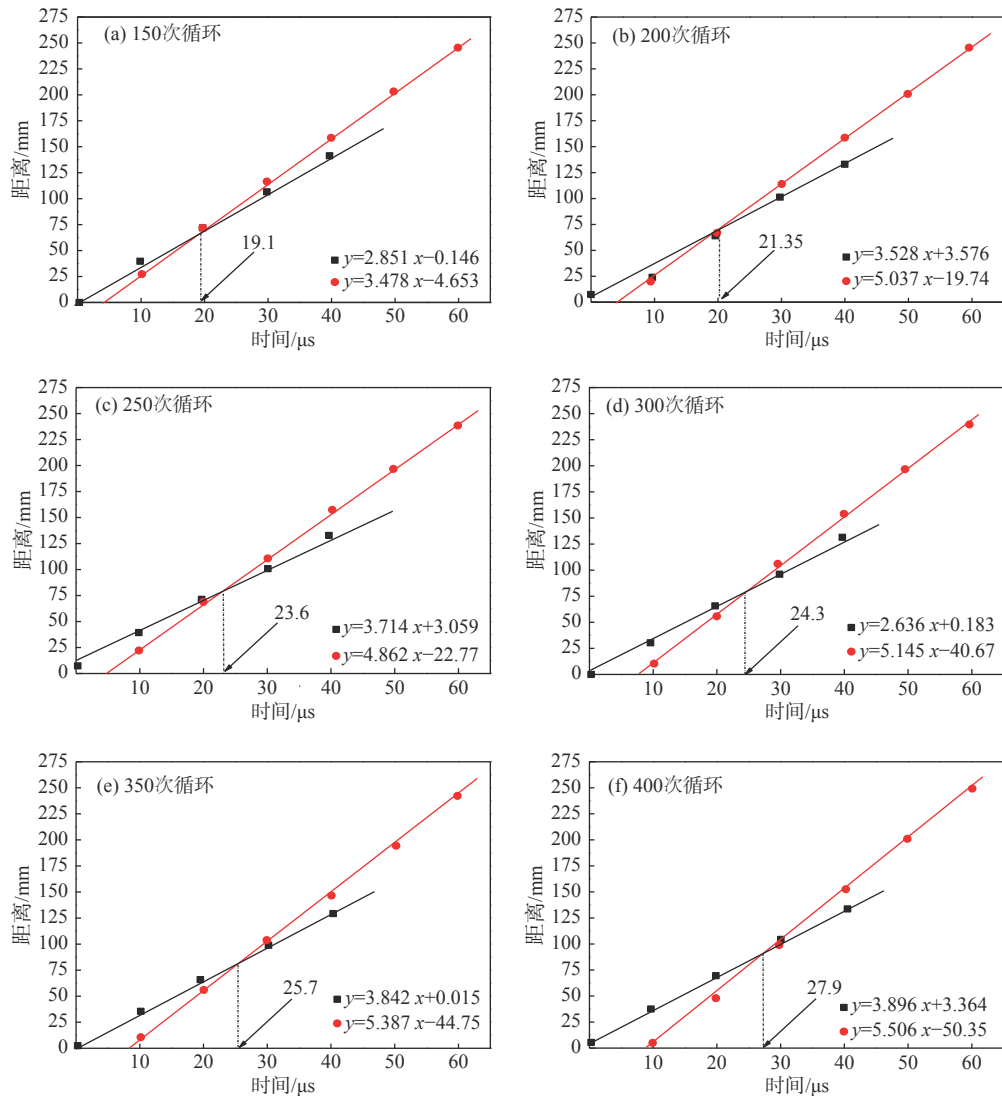


图 1 试件在氯化钠溶液中冻融时间-距离关系

Fig.1 Relationship between time and distance of specimens in sodium chloride solution after freezing and thawing

图 1 中黑色直线段表示超声波在损伤层中传播的时间—距离关系。红色直线段表示超声波穿过损伤层经过未损伤区域内的时间—距离关系。两直线交点位置为损伤层至微损伤部分的分界点,直线的斜率分别表示不同的超声波传播速度,由此典型数据可以看出,在损伤层中超声波传播速率较小,进入到未损伤层中,波速明显增大。除此之外还可以看出,在冻融循环次数增加的过程中,损伤层与未损伤层的交点位置从 19.1 μs 移动到 27.9 μs 逐步增大,说明混凝土试件损伤层厚度大小随着冻融循环次数也在逐渐增加。

如图 2 所示,冻融循环达到 150 次时, C30 混凝土试件损伤层厚度约为 74 mm, C40 混凝土试件损伤层厚度约为 68 mm, C50 混凝土试件损伤层厚度约为 59 mm,在冻融循环达到 400 次时,混凝土试件损伤层厚度分别为 103、93、80 mm,损伤层厚度分别增加了 39.1%、36.7%、35.5%,表明随冻融循环次数的增加,混凝土损伤的深度也在缓慢的增加。这对于北方海上风电混凝土结构基础的耐久性有重要影响,应调整配合比以及外加剂的使用,降低冻融作用的危害。

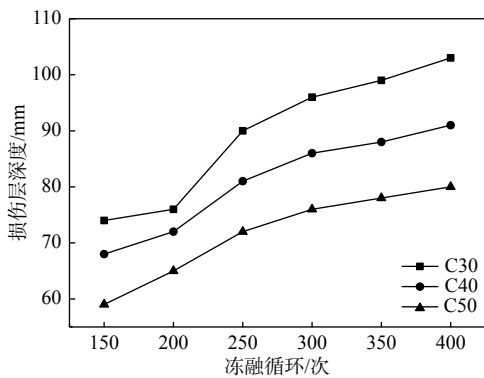


图 2 试件损伤层深度-冻融循环关系
Fig.2 Relationship between depth of damaged layer and freeze-thaw cycle

1.4 强度试验数据分析

为了研究北方海洋环境对混凝土承台基础强度的损伤情况,根据试验方法,将每个强度等级的 6 组标准立方体试块和 6 组棱柱体试块,进行不同循环次数的冻融试验。6 组标准立方体试块进行抗压强度试验,6 组棱柱体试块进行抗折强度试验。根据在 NaCl 溶液中浸泡的试块强度试验结果,分别绘制出 C30、C40、C50 混凝土的抗压强度、抗折

强度和混凝土弹性模量曲线如图 3~5。在冻融循环 150 次后,抗压强度、抗折强度及弹性模量都明显降低, C30 混凝土强度损失 14.3%, C40 混凝土强度损失 8.6%, C50 强度损失仅为 5.4%,随着冻融循环次数的增加,混凝土各种性能指标损失逐渐加剧,到 250 次循环后变化速率降低。由此可以看出,冻融循环在 250~300 次时,混凝土受冻融影响逐渐增大。C30 混凝土的所有性能指标下降速率明显高

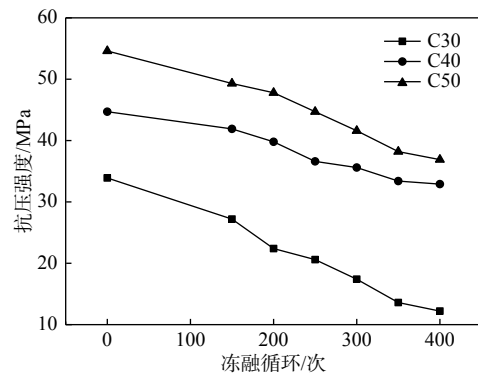


图 3 抗压强度-冻融循环曲线
Fig.3 Compressive strength-freeze thaw cycle curve

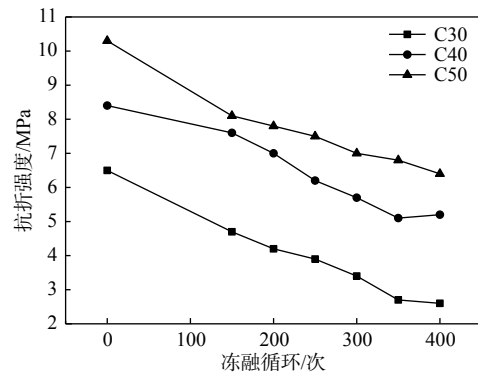


图 4 抗折强度-冻融循环曲线
Fig.4 Flexural strength-freeze thaw cycle curve

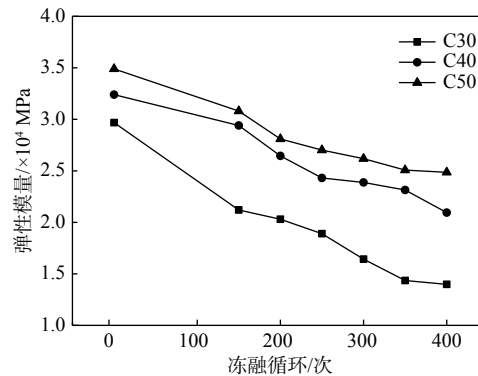


图 5 弹性模量-冻融循环曲线
Fig.5 Elastic modulus-freeze thaw cycle curve

于 C40 和 C50, 而随着强度的增加 C40 和 C50 混凝土各性能指标趋同。试验显示到达一定强度后, 混凝土在模拟海洋环境侵蚀作用下, 并经多次冻融后, 并没有强度的提高而降低, 且未促使耐久性的同比例提高。

2 钢筋拔出试验

2.1 试验方法

钢筋混凝土承台在冻融和氯盐侵蚀后混凝土与钢筋的粘结力测试方法, 3 种强度等级每个强度等级制作 7 组特殊设计的钢筋混凝土拔出试件。混凝土试件尺寸 150 mm × 150 mm × 150 mm 标准试块。钢筋选用直径 16 mm 的 HRB400 变形钢筋。将 21 组试件放入到 10% 的 NaCl 溶液中浸泡 90 天, 并分批按不同冻融循环次数进行冻融。依据《混凝土结构试验方法标准》(GB 50152-2012), 采用中心拔出钢筋来分析受侵蚀的混凝土的粘结强度问题^[6], 以混凝土试件发生破坏为钢筋拔出标准。

2.2 试验现象及数据

2.2.1 试验现象

未经冻融循环的试件, 钢筋拔出试验中, 有大量混凝土随钢筋拔出, 钢筋锚固断面有较宽裂缝出现。在冻融循环达到 250 次时, 开始出现较明显的裂纹。冻融循环达 350 次时, 裂纹分布面积较大, 裂纹较多, 钢筋带出混凝土相对较少, 且以呈粉末状为主。说明试验在冻融循环 250 次后, 损伤速度增快。说明在预埋钢筋的试件中, 钢筋与混凝土的接触界面, 随冻融循环次数增加, 接触面强度削弱逐渐明显。

2.2.2 数据分析

整理试验结果数据, 绘制 C30、C40、C50 3 种强度混凝土试件的破坏荷载、平均粘结强度、劣化系数和平均峰值位移与冻融循环的关系曲线如图 6~9。

结果表明, 从 150 次冻融循环开始, 粘结应力开始逐渐下降、极限滑移量逐渐增大, 说明在 150 次冻融循环下, 混凝土与钢筋的粘结效果受冻融循环次数影响较为明显。到达 250 次冻融循环时, 应力、位移变化速率达到高峰, 随后冻融循环作用下, 应力和位移趋势变缓, 说明冻融循环在 250 次后,

对混凝土冻融效果降低, 这是由于外层混凝土在剥离前可以对内层混凝土起到一定的缓冲作用。C30、C40、C50 混凝土拉拔试件在 150 次冻融循环作用下, 破坏荷载、平均粘结强度分别损失 10.3%、7.7%、5.5%, 平均峰值位移分别增大 8.6%、7.3%、4.7%; 在 400 次冻融循环后, 较 250 次冻融循环分别下降 14.3%、11.2%、7.6%, 由此可以看出, 混凝土强度提升, 在海洋腐蚀并多次冻融的环境中, 混凝土构件对钢筋保护也随之明显提高。

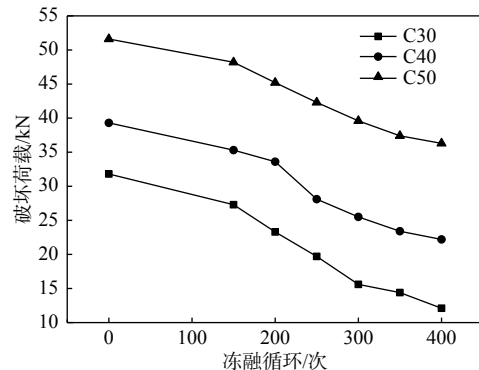


图 6 破坏荷载-冻融循环曲线

Fig.6 Failure load-freeze thaw cycle curve

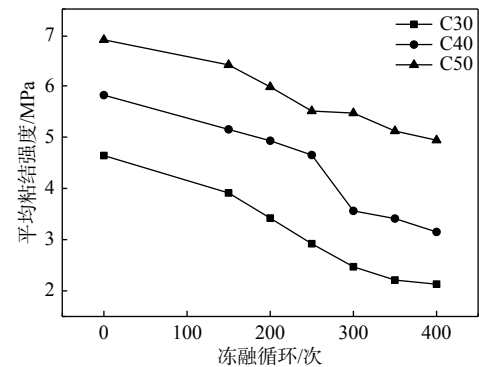


图 7 平均粘结强度-冻融循环曲线

Fig.7 Average bond strength-freeze thaw cycle curve

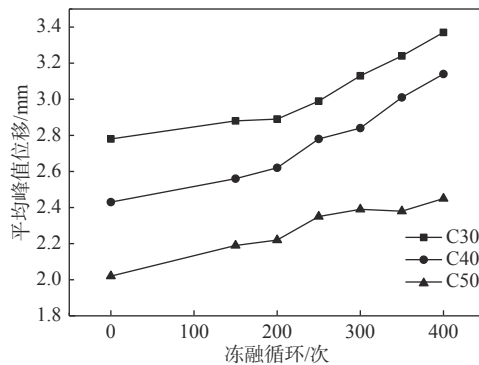


图 8 平均峰值位移-冻融循环曲线

Fig.8 Average peak displacement-freeze thaw cycle curve

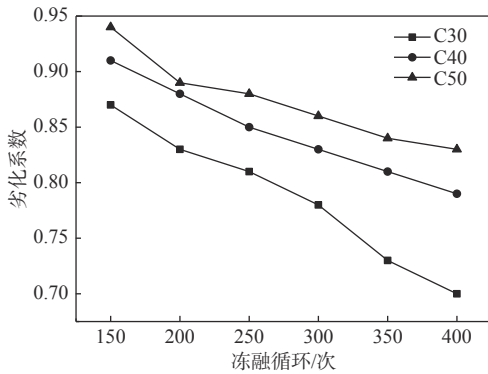


图9 劣化系数-冻融循环曲线

Fig.9 Deterioration factor-freeze thaw cycle curve

3 混凝土风电承台冻融循环模拟分析

根据前面试验测试所得的参数结合海上风电工程实际,应用 ANSYS 通用软件来建模分析计算风电基础承台,此方法与一般的固体力学中的有限元分析在基本原理与方法上基本上是一致的,但如何进行结构的离散化,又有所不同。模拟受静力荷载和冻融耦合双重作用下^[7],混凝土承台的力学性能状态,为使得有限元计算过程顺利进行,本模拟过程中忽略混凝土和钢筋间的黏结滑移影响。

3.1 模拟计算工况

混凝土风电承台选择直径 14 m,厚度 5 m 的钢筋混凝土承台^[8],配筋率取 1.6%,考虑 C30、C40、C50 混凝土分别在冻融循环为 0 次、150 次、200 次、250 次、300 次、350 次、400 次情况下,混凝土承台在风机荷载和冰凌荷载^[9]作用下产生的最大应力和最大应变。

3.2 建立有限元模型

选用 Ansys 有限元软件中 solid65 单元模拟钢筋混凝土材料,建立整体式钢筋混凝土结构模型如图 10。

在设置材料参数时,考虑未冻融混凝土采用混凝土 W-W 五参数破坏准则,不同冻融次数下的混凝土弹性模量和抗压强度可由立方体标准试块测出^[10]。冻融后混凝土的破坏准则通过单轴抗拉强度和单轴抗压强度来确定,冻融影响的混凝土应力-应变关系按式(1)和(2)^[11]确定。

$$y = ax + (3 - 2a)x^2 + (a - 2)x^3, 0 \leq x \leq 1 \quad (1)$$

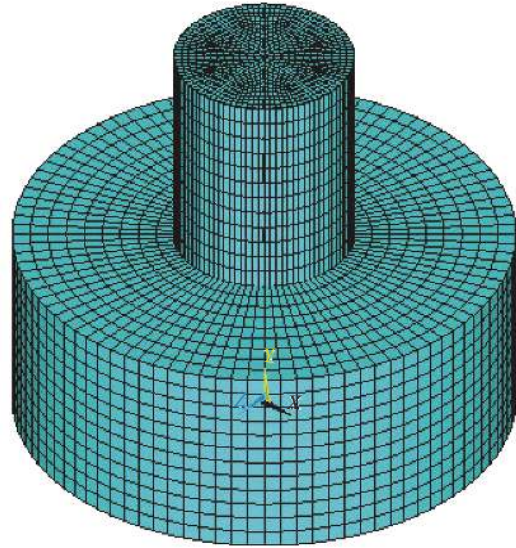


图10 混凝土承台有限元模型

Fig.10 Finite element model of concrete bearing platform

$$y = \frac{x}{b(x-1)^2 + x}, x > 1 \quad (2)$$

$$a = -0.0143\Delta P_n + 1.744; b = 0.0796\Delta P_n + 1.582; \Delta P_n = -3.57 + 3.50e^{\frac{n}{122}}; x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cd}}; y = \frac{\sigma}{f_{cd}}$$

式中: ΔP_n 为经 n 次冻融循环后试件的相对动弹性模量损失率;

ε 为混凝土压应变;

σ 为混凝土压应力;

ε_{cd} 为不同冻融循环次数下混凝土试件的峰值应变;

f_{cd} 为不同冻融循环次数下混凝土试件的峰值应力;

a 、 b 分别为应力应变曲线上上升段和下降段的控制参数。

3.3 计算结果分析

(1) 根据本文试验过程试验方法和试验参数,通过有限元模拟计算获得 C30、C40、C50 3 种混凝土材料承台在不同冻融循环次数的最大应力值,与相同冻融循环下的强度试验结果对比如表 2,并绘制曲线如图 11。在冻融循环达到 300 次时, C30 混凝土承台模拟计算最大压应力达到 21.3 MPa,已经超过次循环次数下 C30 混凝土试件抗压强度 18.1 MPa,承台便已经产生破坏,而 C40、C50 在 400 次冻融循环下的计算最大压应力分别为 22.7、20.6 MPa,都分别小于其强度试验所得到的抗压强度 24.2、

38.3 MPa, 说明在 400 次冻融循环作用下, 此强度等级在该工况下仍可以保证混凝土承台的承载力要求。

表 2 计算应力分析

Table 2 Analysis of calculation stress

| 混凝土强度 | 冻融循环/次 | 模拟计算最大压应力/MPa | 试验强度值/MPa |
|-------|--------|---------------|-----------|
| C30 | 0 | 16.8 | 33.9 |
| | 150 | 18.1 | 29.2 |
| | 200 | 18.6 | 25.8 |
| | 250 | 19.7 | 21.6 |
| | 300 | 21.3 | 18.1 |
| | 350 | 23.2 | 15.6 |
| | 400 | 24.9 | 13.2 |
| | C40 | 0 | 16.8 |
| 150 | | 17.6 | 40.1 |
| 200 | | 18.6 | 37.3 |
| 250 | | 19.8 | 33.2 |
| 300 | | 21.4 | 29.6 |
| 350 | | 22.1 | 26.4 |
| 400 | | 22.7 | 24.2 |
| C50 | | 0 | 16.8 |
| | 150 | 17.5 | 51.3 |
| | 200 | 18.2 | 48.8 |
| | 250 | 18.9 | 45.7 |
| | 300 | 19.7 | 42.6 |
| | 350 | 20.1 | 40.1 |
| | 400 | 20.6 | 38.3 |

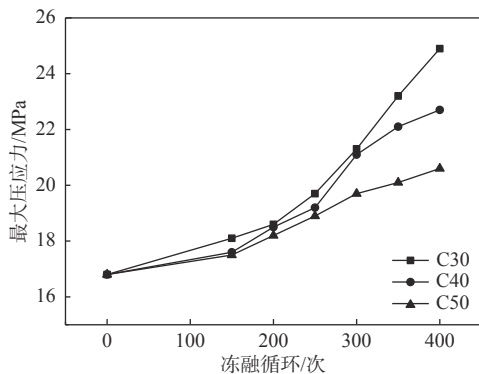


图 11 最大压应力-冻融循环次数曲线

Fig.11 Maximum stress-freeze thaw cycles curve

(2) 根据本文试验过程试验方法和试验参数, 通过有限元模拟计算获得 C30、C40、C50 3 种混凝土材料承台在不同冻融循环次数的最大变形值, 并绘制曲线如图 12。可以看出, C50 混凝土承台相对最大变形仅为 8.1 mm, 而 C30 混凝土承台相对变形可达 11.2 mm, 所以, C50 混凝土承台更适应于对变形要求较高的风电基础结构。

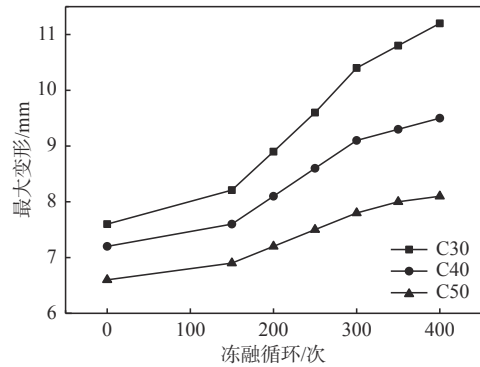


图 12 最大变形-冻融循环次数曲线

Fig.12 Curve of maximum deformation-freeze thaw cycles

(3) 通过计算结果分析, 可以看出: 通过冻融循环数值模拟计算, 得到 C30、C40、C50 3 种不同强度等级的风电基础混凝土承台的最大应力平均增大百分比为 7.3%、5.2%、3.6%, 其中 C30 等级混凝土最大应力达到 24.9 MPa, 而浸蚀冻融的 C30、C40、C50 3 种试块抗压强度平均折减百分比为 14%、8.9%、5.3%, C30 等级混凝土试件最小抗压强度值仅为 13.2 MPa。主要是由于数值模拟计算过程中未考虑海水侵蚀影响。冻融模拟计算结果与试验分析结果展示出来的规律基本一致。

(4) 耐久性分析: 以辽宁地区为例, 根据中国气象局网站资料, 历年气象统计数据, 对我国代表城市沈阳的当量冻融循环次数为 5.21 次/a, 冻融循环 150 次大概需要时间为 30 a, 冻融循环 250 次大概需要时间为 50 a^[12]。计算得 C30 混凝土承台 250 次冻融循环时最大应力达到 19.7 MPa, 而在该冻融循环时, C30 混凝土抗压强度为 21.6 MPa, 则冻融循环达 250 次前, C30 混凝土承台已经发生破坏, 所以推断在冻融循环 200 次时混凝土承台便开始接近破坏状态, 此时混凝土承台使用寿命为 40 a。由于我国海上风电场基础结构普遍设计寿命为 50 a, 因此应考虑氯盐侵蚀条件下和冻融环境相结合的工况, 应适当加大混凝土保护层厚度, 提高混凝土强度等级, 并充分利用外加剂效果。

4 结论

通过试验研究和数值模拟计算可以得出以下认识:

(1) 钢筋拉拔试件试验中, 冻融循环达到 250 次时, 冻融循环对钢筋与混凝土粘结强度的影响平

均增大 8.4%，在 250 次冻融循环后，冻融循环对其破坏速度便趋于稳定。而棱柱体试件测试则说明，冻融循环达到 300 次时，棱柱体抗压、抗折损伤平均增长 6.8%。

(2) 冻融循环超过 300 次后，C30、C40、C50 混凝土结构损伤已经分别达到 45%、40%、26.5%，强度损失出现增大趋势，北方沿海风电工程混凝土基础结构在设计过程中要考虑长期冻融的侵蚀环境对结构的损伤能力。

(3) 冻融循环次数的增加过程中，C50 混凝土强度平均损失率比 C30 混凝土低 8.7%，建议海上风电多桩承台混凝土结构可采用较高强度等级混凝土来提高结构增强耐久性能，从而增加使用寿命。

(4) 数值模拟计算结果可以看出，C50 混凝土结构受北方冻融环境影响程度比 C30 混凝土结构低 21.5%，更加高效的提高了海上风电基础的耐久性。同时，可以根据计算应力值，与试验所得强度值比较，估算结构破坏时冻融循环数量，从而推断结构耐久性年限。

参考文献:

[1] 河北省质量技术监督局. DB13/T 2245—2015 环渤海耐氯盐水

工混凝土技术规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社.

- [2] 郑晓宁, 刁波, 孙洋, 等. 混合侵蚀与冻融循环作用下混凝土力学性能劣化机理研究[J]. 建筑材料学报, 2010, 31(2): 111-116.
- [3] 李金玉, 曹建国. 水工混凝土耐久性的研究与应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 2-3.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50082—2009, 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社.
- [5] 李平先, 赵国藩, 张雷顺. 受冻融损伤混凝土与新混凝土的粘结剪切性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(5): 111-117.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50152—2012, 混凝土结构试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社.
- [7] 胡强圣, 张平. 冻融后预应力混凝土构件受弯性能有限元模拟[J]. 齐齐哈尔大学学报(自然科学版), 2020, 36(2): 48-51.
- [8] 王伟, 杨敏. 海上风电机组地基基础设计理论与工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014: 105-107.
- [9] 何岩松, 王健飞, 赵怀宇. 海上风机荷载计算及组合研究[J]. 建筑结构, 2012, 42(增刊2): 412-416.
- [10] 施士升. 冻融循环对混凝土力学性能的影响[J]. 土木工程学报, 1997, 30(4): 35-42.
- [11] 邹超英, 赵娟, 梁锋. 冻融环境下混凝土应力-应变关系的试验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(2): 229-231.
- [12] 殷英症, 李志国. 我国代表城市混凝土冻融循环次数探讨[J]. 低温建筑技术, 2015(11): 12-14.

RESEARCH ON CONCRETE DURABILITY OF MULTI-PILE CAP IN WIND POWER PROJECTS UNDER A FREEZE-THAW ENVIRONMENT IN THE COAST OF NORTH CHINA

JIA Yanbing

(China Longyuan Power Group Co., Ltd., Beijing 100034, China)

Abstract: The physical and engineering properties of concrete pile cap are known to be affected by the aggressive ocean environment and the freeze-thaw effects, which are commonly encountered in wind power projects in shallow waters in Northern China. In this research, compressive strength tests and flexural strength test have been carried out under simulated ocean conditions with the freeze-thaw cycles and sodium chloride solution immersion. In addition, rebar Pulling tests are performed to enhance the understanding of the impact on the bond strength of different grade of concrete due to the freeze-thaw cycles and chloride exposure. The degradation mechanism subject to the combined effect of freeze-thaw cycles and Chlorine ion are further studied using the ultrasonic testing technique. In the end, the paper presents finite element analyses conducted to model structural behavior of pile cap operating conditions. The study may provide references to wind power projects under similar operating environment in freeze-thaw waters in Northern China.

Key words: frost resistance; wind power foundation; ultrasonic testing; numerical simulation