

盐冻环境下钢筋混凝土梁抗弯性能仿真分析

徐 港, 谢晓娟, 艾天成, 王 青

(三峡大学 土木与建筑学院, 湖北宜昌 443002)

摘 要:采用数值模拟技术同时考虑到混凝土力学性能及钢筋混凝土粘结性能受盐冻融作用的损伤,对经历不同盐冻融循环次数后钢筋混凝土梁的抗弯性能进行了非线性分析,研究了其抗力性能受盐冻融循环作用的影响规律。结果表明:盐冻环境下梁抗弯性能退化的主要原因是由于混凝土力学性能的降低,而粘结性能退化对梁抗力性能的影响并不显著;盐冻融作用达到一定程度后钢筋混凝土梁的破坏类型会发生改变,将由适筋破坏转换为超筋破坏;梁端锚固区粘结性能的冻融损伤对梁抗力性能有一定程度的影响,尤其当冻融程度较严重时,梁的承载力较锚固良好时约有4%左右的降幅。

关键词:钢筋混凝土梁;盐冻;承载力;仿真分析

中图分类号: TU375.1 **文献标志码:** **文章编号:** 1674-4764(2012)02-0063-06

Simulation Analysis of Flexural Performance of Reinforced Concrete Beam in Salt-frost Environment

XU Gang, XIE Xiao-juan, AI Tian-cheng, WANG Qing

(College of Civil Engineering & Architecture, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, P. R. China)

Abstract: Considering the damage of concrete mechanical properties and bonding behavior between the steel bar and concrete after the freezing and thawing function in the numerical simulation, the nonlinear analysis on flexural performance of reinforced concrete beam which experiences different salt-frost cycles is conducted, and the evolution law of resistance performance of reinforced concrete beam is studied. It is shown that, in the salt-frost environment, the decrease of concrete mechanical properties is the main reason that causes the degeneration of RC beam on flexural performance, while the reduction of bonding property has an unobvious effect on the beam resistance performance. When the salt-frost cycles reach a certain level, the beam failure pattern would change from the under-reinforced failure to over-reinforced failure. The freeze-thaw damage of bonding property in the beam-ends anchorage zone has a certain effect on the beam resistance behavior, especially for the more serious freeze-thaw degree, the resistance performance of the beam reduces about 4% than the perfect anchor beam.

Key words: reinforced concrete beam; salt-frost; bearing capacity; simulation analysis

寒冷地区撒除冰盐的道路、桥梁以及海边建筑物经常会遭受到非常严重的盐冻破坏,盐冻循环作用是影响钢筋混凝土结构耐久性的主要因素。目前,国内外学者在材料层次上就盐冻作用后混凝土

力学性能变化规律已进行了较为广泛的研究,并取得了一定成果,但是在构件层次上对盐冻环境下钢筋混凝土构件抗力性能劣化规律的研究较少^[1-3],尤其是考虑盐冻融作用对混凝土的力学性能及其与钢

收稿日期: 2011-08-30

基金项目: 湖北省自然科学基金计划创新群体项目(2010CDA076);高速铁路建造技术国家工程实验室开放基金;湖北省教育厅科学研究计划重点项目(D20091310)

作者简介: 徐港(1974-),男,博士(后),主要从事混凝土结构耐久性研究, (E-mail)postxg@163.com。

筋粘结滑移性能损伤共同导致构件抗力性能劣化方面的研究更鲜见报道。考虑到现有冻融试验设备的局限性,尚难以通过试验手段对大尺寸混凝土构件进行冻融试验,为此本文采用数值仿真方法,并考虑到盐冻作用后混凝土力学性能退化和钢筋与混凝土粘结滑移性能的劣化,利用有限元软件 DIANA 对经受不同盐冻融循环次数作用后钢筋混凝土梁的受弯性能进行了数值模拟,探究了随盐冻融次数增加混凝土梁抗力性能的演变规律,以期相应环境下混凝土结构安全评估和耐久性设计提供参考。

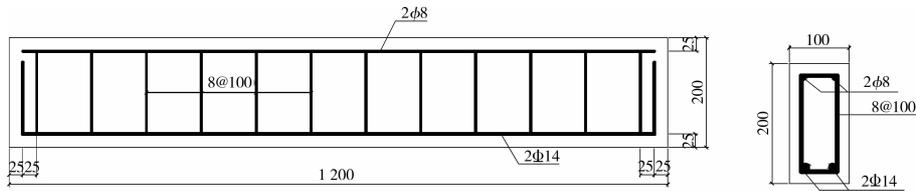


图 1 试验梁配筋

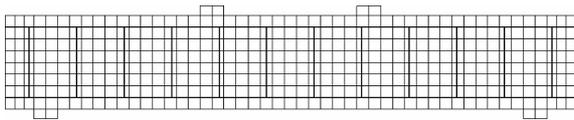


图 2 钢筋混凝土梁有限元模型

表 1 混凝土配合比及材料力学性能

材料	单位体积材料 用量/kg	28 d $f_{cu}/$ MPa	$f_y/$ MPa	$f_u/$ MPa
水:水泥:砂:石子				
混凝土	195:398:596:1211	32.02	—	—
钢筋($\Phi 14$)	—	—	351	518.0
箍筋($\phi 8$)	—	—	355	472.5

1.2 本构模型

1.2.1 材料本构模型 混凝土受拉本构采用 Hordijk 软化模型,混凝土受压本构采用 Thorenfeldt 模型^[4],裂缝模型采用全应变旋转裂缝模型。模型所需混凝土断裂能值由 Ceb-fip Model Code 1990^[5]建议的公式,如式(1)计算;混凝土断裂带宽值,根据文献^[6]按式(2)计算。

$$G_f = G_{f0} \cdot \left(\frac{f_{cm}}{f_{cm0}} \right)^{0.7} \quad (1)$$

$$L_{cr} = \sqrt{A} \quad (2)$$

式中: $f_{cm0} = 10$ MPa; G_{f0} 根据最大骨料粒径(d_{max})选用,本文取 $d_{max} = 16$ mm, A 为有限元网格中一个单元的面积。

钢筋采用了 Von Mises 双线性理想弹塑性模型,如式(3)、(4)。

$$\sigma_s = E_s \varepsilon_s \quad \varepsilon_s \leq f_y / E_s \quad (3)$$

1 仿真分析模型

1.1 基本参数

依据实验室已浇筑试验梁尺寸、配筋等参数,如图 1,建立仿真分析模型,如图 2。梁材料力学性能如表 1。仿真分析时为了避免应力集中的影响,在支座和集中荷载处设置刚性垫块,通过共节点使垫块与混凝土位移协调。试件采用位移加载,加载方式与物理实验方法相同采用四点弯曲,三分点加载。

$$\sigma_s = f_y \quad \varepsilon_s \geq f_y / E_s \quad (4)$$

式中: σ_s 、 ε_s 、 E_s 、 f_y 分别为钢筋的应力、应变、弹性模量和屈服强度。

1.2.2 粘结滑移本构模型 徐有邻^[7]对钢筋与混凝土的粘结锚固性能进行了较为系统的研究,相关研究成果已被广泛采用^[8-10],因此本文采用文献^[7]给出的五段式粘结滑移曲线作为钢筋混凝土基准粘结滑移本构。文献^[11-12]研究表明混凝土构件经盐冻融循环作用后,不仅混凝土强度降低,钢筋与混凝土的粘结强度也将发生退化。而文献^[13-14]通过试验研究还发现,相同粘结应力时的滑移量随着冻融次数的增加而增大,且文献^[14]通过对试验数据的拟合分析,建立了与冻融次数、粘结强度相关的滑移量计算表达式,如式(5),由此可基于对基准粘结滑移本构中特征滑移量的修正得到不同盐冻融循环次数后的粘结滑移关系曲线,如图 3。

$$S(\tau, n) = f(\tau, n) \cdot s_0 \quad (5)$$

式中: $S(\tau, n)$ 为 n 次冻融作用后粘结应力为 τ 时的滑移; $f(\tau, n)$ 为 n 次冻融作用后粘结应力为 τ 时相对于未冻试件钢筋滑移的变化函数,可由式(6)~(8)确定^[14]; S_0 为未冻时钢筋的滑移,可由基准模型确定。

$$f(\tau, 50) = 1.08 \cdot \tau, \tau \leq 4.5 \text{ MPa}; f(\tau, 50) = 64.353 \cdot e^{-0.199 \cdot 8\tau}, \tau > 4.5 \text{ MPa} \quad (6)$$

$$f(\tau, 75) = 2.03 \cdot \tau, \tau \leq 4.5 \text{ MPa}; f(\tau, 75) = 16.41 \cdot e^{-0.117 \cdot 3\tau}, \tau > 4.5 \text{ MPa} \quad (7)$$

$$f(\tau, 100) = 5.94 \cdot \tau, \tau \leq 4.5 \text{ MPa}; f(\tau, 100) = 8.763 \cdot e^{-0.122 \cdot 7\tau}, \tau > 4.5 \text{ MPa} \quad (8)$$

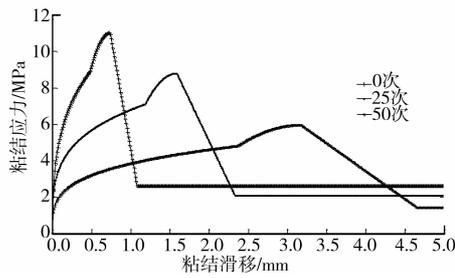


图3 不同盐冻融循环次数后的粘结-滑移曲线

1.3 单元的选用

仿真模型中,混凝土视为各向同性材料,采用8节点等参四边形的平面应力单元 CQ16M 模拟混凝土;纵向受拉钢筋采用 L2TRU 单元模拟,并通过杆单元截面的变化和强度条件来模拟不同截面面积和不同强度的钢筋;箍筋与架立筋采用埋入式钢筋单元,即认为其与混凝土粘结完好;钢筋与混凝土之间的粘结滑移采用4节点线性界面单元 L8IF 模拟,该单元由两条线组成,是一种无厚度的界面单元。

1.4 混凝土力学性能指标的确定

文献[15]通过试验较系统地研究了水冻作用对混凝土轴心抗压强度的影响规律,得到了混凝土峰值应力与冻融循环次数之间的关系表达式:

$$\frac{f_{cD}}{f_{c0}} = 1 - 200f_{cu}^{-3.0355} \cdot N_{water} \quad (9)$$

式中: f_{cD} 为冻融后混凝土的棱柱体强度; f_{c0} 为冻融循环前混凝土的棱柱体强度; N_{water} 为水冻融循环次数。

盐冻环境下混凝土破坏较水冻更加严重,相同次数下的损伤也更大,故盐冻次数与水冻次数并不等效。鉴于此笔者基于文献[16-17]试验数据并经试验验证,建立了盐冻作用后混凝土强度退化方程^[14],得到混凝土强度受盐冻与水冻作用次数间换算关系式,如式(10)。

$$N_{water} = \lambda \cdot N_{salt} \quad \lambda = 2.5 \quad (10)$$

式中: N_{water} 为水冻次数; N_{salt} 为盐冻次数; λ 为盐冻与水冻的等效系数;即1次盐冻相当于2.5次水冻。

综上,在已知混凝土初始强度条件下,通过式(9)和式(10)即可求得不同盐冻作用次数后试验梁的混凝土立方体抗压强度平均值,如表2,而盐冻融循环作用后混凝土的弹性模量,假设仍满足现行《混凝土结构设计规范》^[18]公式,如式(14),可由相应冻融循环次数后的立方体抗压强度标准值求得。

$$E_c = \frac{10^5}{2.2 + \frac{34.7}{f_{cu,k}}} \quad (11)$$

式中: $f_{cu,k}$ 为混凝土抗压强度标准值。

表2 混凝土立方体抗压强度值

盐冻次数/次	f_{cu}/MPa	$f_{cu,k}/\text{MPa}$
0	32.02	25.44
25	21.24	14.66
50	10.45	3.87

由于混凝土热传递的影响,混凝土表面与内部之间存在着一定的温差,内部温度较表面变化小,这就造成混凝土的冻融损伤内外并不均匀。文献[15]给出了混凝土冻结温度与混凝土冻融破坏的关系,结果表明温差越大,破坏越严重,试件内外损伤并不一致。李金玉和曹建国^[19]的研究也认为,混凝土的冻融破坏不仅与冻融循环次数有关,还与冻结温度有关。以上研究说明混凝土试件内部局部强度与整体强度存在较大差异。为此,在仿真分析时尚需考虑冻融作用后混凝土强度分层退化的影响,以便更加真实的反映混凝土梁遭受盐冻融破坏的特点。

文献[15]假设冻融循环作用试件表面温度的变化为简谐波形式,如下式(12),并通过分离变量的方法得到了温度场的表达式,推导出混凝土中的温度分布,如式(13)。

$$\theta(0,t) = T_m + A_w \cos\left(\frac{2\pi t}{t_c}\right) \quad (12)$$

$$\theta(d,t) = T_m + A_{w,d} \cos\left(\frac{2\pi t}{t_c} - \sqrt{\frac{\pi}{\beta t_c}} d\right) \quad (13)$$

式中: $\theta(d,t)$ 为试件内距表面深度为 d 处的温度; t 为时间; T_m 为平均温度; $A_{w,d} = A_w \exp\left(-\sqrt{\frac{\pi}{\beta t_c}} d\right)$; A_w 为构件表面的温度波振幅; t_c 为冻融循环周期; β 为热扩散系数。按式(14)计算。

$$\beta = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad (14)$$

式中: λ 为混凝土导热系数,可根据朱伯芳模型^[20]计算,如式(15); ρ 为混凝土密度; c_p 为混凝土比热。

$$\lambda = \omega_p \lambda_p + \omega_w \lambda_w + \omega_{fa} \lambda_{fa} + \omega_{ca} \lambda_{ca} \quad (15)$$

式中: λ_p 、 λ_w 、 λ_{fa} 、 λ_{ca} 分别为水泥、水、细骨料、粗骨料的导热系数; ω_p 、 ω_w 、 ω_{fa} 、 ω_{ca} 分别为水泥、水、细骨料、粗骨料质量占混凝土总质量的百分比。

综上,构件内任意深度处的温度变化可看作是以 T_m 为基准,以 $A_{w,d}$ 为振幅的简谐波。其频率与外界温度波的频率相同,但振幅减小,相位滞后。另外,考虑到寒冷地区的桥面板在运营过程中,桥面上表面因洒盐除冰会使板遭受一定盐冻破坏;桥面板的下表面由于水汽和潮气的影响混凝土也处于潮湿和湿润的状态,低温时会导致结冰,将受到冻融的影响,故本文有限元模型中考虑梁上下两面盐冻,并假

设试件表面最高温度为 $8\text{ }^{\circ}\text{C}$, 最低温度为 $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_m = -4.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $A_w = 12.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_c = 6\text{ h}$ 。将相关数据代入前式(12)~(15)计算可知在距表面 75 mm 深度处, 最大温度已降至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 如图4, 表明混凝土已不在受冻融交替的作用, 因此以 75 mm 深度作为冻融区与非冻融区的交界, 据此可将梁截面划分为3个区域, 如图5。

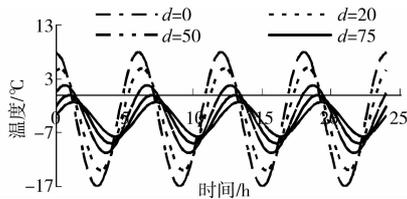


图4 试件内温度随时间变化图

2 仿真结果分析

2.1 未冻融梁仿真与试验结果比较

比较未冻融梁仿真与试验研究结果, 如图6、图7, 可见无论是裂缝分布形态还是荷载挠度关系曲线两者均比较接近, 至于仿真梁在钢筋屈服后承载力未有增加则是由于所选钢筋本构模型中未考虑强化阶段造成的; 另外, 由试验测得梁的开裂荷载和极限荷

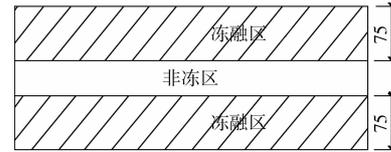


图5 梁截面冻融区划分图

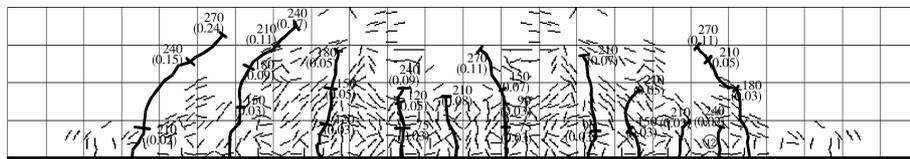


图6 仿真与试验梁的裂缝分布形态比较

载分别为 25 kN 和 100 kN , 而仿真分析所得相应值分别为 22.4 kN 和 96.6 kN , 两者十分相近, 进一步说明仿真模型是合理的。

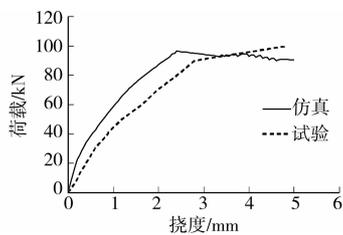


图7 未冻融梁的试验与仿真荷载挠度曲线比较

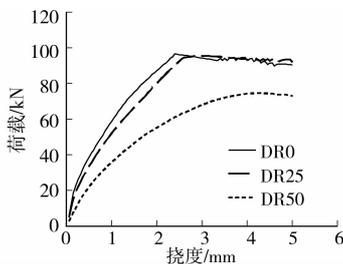


图8 经历不同冻融次数梁的荷载挠度曲线

2.2 冻融作用对梁开裂荷载的影响

盐冻融作用对梁开裂荷载的影响, 如图8, 可见与未冻试件 DR0 相比, 受冻融循环作用梁的开裂荷载值略有降低, 但开裂荷载的降低与冻融次数并非正相关, 如表3。

表3 梁开裂荷载理论值与仿真分析值

冻融循环次数/次	理论值/kN	仿真值/kN	理论值-仿真值/理论值/%
0	25.0	22.4	10.2
25	21.5	18.7	13.1
50	21.6	18.6	14.0

为了深入阐明影响冻融梁开裂荷载大小的因素, 首先仅考虑冻融作用对混凝土强度和弹性模量的影响, 按混凝土梁开裂弯矩 (M_{cr}) 计算公式^[21], 如式(16), 求出诸梁的开裂弯矩, 并由加载点距支座的距离求得开裂荷载, 如表3, 可见, 理论与仿真值具有很好的相关性; 其次对比分析相同冻融循环次数下不考虑粘结滑移性能退化(情形1)、考虑粘结强度退化但不考虑滑移量增大(情形2)及考虑粘结滑移性能退化(情形3)3种情形的仿真结果, 如图9、图10, 说明盐冻融环境下梁的开裂荷载几乎不受粘结性能退化的影响。由此可见, 混凝土强度和弹性模量退化才是引起冻融梁开裂荷载下降的主要原因。

$$M_{cr} = f_t b (h - x_{cr}) \left(\frac{h - x_{cr}}{2} + \frac{2x_{cr}}{3} \right) + 2a_E f_t A_s \left(h_0 - \frac{x_{cr}}{3} \right) \quad (16)$$

$$x_{cr} = \frac{1 + \frac{2a_E A_s}{bh}}{1 + \frac{a_E A_s}{bh}} \cdot \frac{h}{2} \quad (17)$$

式中: f_t 为混凝土轴心抗拉强度; b 为梁截面宽度; h 为梁截面高度; h_0 为梁截面有效高度; A_s 为纵向受拉钢筋面积; a_E 为钢筋与混凝土的弹模比。

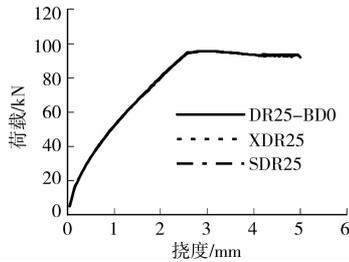


图 9 盐冻 25 次梁的荷载挠度曲线

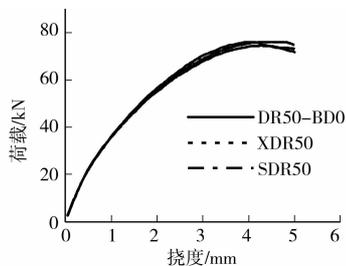


图 10 盐冻 50 次梁的荷载挠度曲线

注: DR_n -BD0、 XDR_n 、 SDR_n 分别表示情形 1、情形 2、情形 3; n 为冻融循环次数。

2.3 冻融作用对梁破坏形态的影响

在盐冻融作用 25 次以内,梁的荷载-挠度关系曲线与完好梁相似,可分为 3 个阶段,呈延性破坏特征,为适筋破坏,如图 8。但经历 50 次盐冻融作用后梁的破坏形态却有明显变化,由图 8 可见达到峰值荷载后梁持荷时间很短,且从仿真模型中读取梁底受拉纵筋最大拉应力值发现尚未达屈服强度,说明梁的破坏是由于梁顶混凝土强度不足造成的,属超筋破坏,但值得注意的是在冻融梁承载力明显下降前,其变形量与未冻融梁相近,并未减少,与一般超筋梁破坏特征并不相同,这可能是由于冻融作用使混凝土内部微裂缝增多,材料变得更为“疏松”,导致混凝土的强度、弹模及其与钢筋的粘结强度降低,致使梁抗弯刚度降低的缘故。

综上说明盐冻融作用达到一定程度后钢筋混凝土梁的破坏形态发生改变,由适筋破坏转换为超筋破坏。

2.4 冻融作用对梁抗弯承载能力的影响

仿真分析表明,随盐冻融循环次数增加梁的承载力逐渐减小,如图 8,可见在经受 25 次盐冻融循

环作用以内,梁的抗弯能力降低不多,但当冻融循环次数达 50 次后,承载力显著下降,仅为完好梁的 79%,如表 4。

分析原因,仍然首先仅考虑冻融作用对混凝土强度的影响,按钢筋混凝土梁抗弯承载力计算公式,求出诸梁极限承载力的理论值,如表 4,可见理论值与仿真值吻合良好;其次依 2.2 节描述的 3 种情形列出相应仿真结果,如表 4,可见只有当盐冻融次数达 50 次粘结滑移性能的退化才会对梁的极限荷载产生一定影响,所以冻融作用后梁承载力的退化也主要是由于混凝土强度降低引起的,受粘结性能劣化程度影响较小。

表 4 采用不同粘结滑移本构梁的抗弯承载力

冻融次数/次	理论值/kN	情形 1/kN	情形 2/kN	情形 3/kN
0	91.0	96.6	—	—
25	87.9	95.4	95.4	95.4
50	75.2	76.0	76.2	74.6

2.5 梁端锚固情况对梁抗力性能的影响

前述仿真模型中均假设梁端钢筋锚固良好,设锚固区内钢筋与混凝土间无相对滑移,但考虑到当环境极其恶劣时锚固区也可能遭到破坏的情形,故通过在锚固区引入粘结滑移本构对考虑锚固区粘结性能退化的情况也进行了仿真分析。结果表明锚固区是否引入相应冻融循环次数后的粘结滑移关系,对梁的开裂荷载大小并无影响,但对梁的极限荷载有一定影响,如表 5,当受盐冻融循环作用 50 次后考虑锚固区粘结性能退化比不考虑时,承载力下降约 4.3%。

表 5 不同锚固情况时梁的抗弯承载力

冻融次数/次	理论值/kN	不考虑锚固损失/kN	考虑锚固损失/kN
0	91.0	96.6	95.4
25	87.9	95.4	94.8
50	75.2	74.6	71.4

3 结 语

综合考虑盐冻融作用对混凝土力学性能和钢筋与混凝土粘结滑移性能的影响,采用数值仿真技术研究了盐冻融循环作用后钢筋混凝土梁的抗弯性能。主要得到如下结论:

1) 盐冻融环境下梁抗弯性能退化的主要原因是由于随冻融循环次数增加混凝土力学性能的降低。

2) 盐冻融循环引起的粘结性能退化对梁的抗力性能影响不大,对开裂荷载大小几乎无影响,经多次

冻融循环后,对极限承载力会有一定影响,使之降低。

3)盐冻融作用达到一定程度后钢筋混凝土梁的破坏形态将发生改变,由适筋破坏转换为超筋破坏。

4)盐冻融循环作用后梁端锚固区粘结性能的损伤对梁抗弯承载力有一定影响,尤其当冻融程度较严重时,梁的承载力较锚固良好情况约有4%左右的降幅。

参考文献:

- [1] PETERSEN L, LUDGER L, MARIA A P. Influence of freezing-and-thawing damage on behavior of reinforced concrete elements [J]. ACI Materials Journal, 2007, 104(4): 369-378.
- [2] 张云清,余红发,王甲春. 钢筋混凝土构件的抗盐冻性能研究 [J]. 硅酸盐通报, 2010, 29(2): 345-351.
ZHANG YUN-QING, YU HONG-FA, WANG JIA-CHUN. Study of salt freezing resistance of concrete member [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2010, 29(2): 345-351.
- [3] KAMYAB Z H, PETER U, KARIN L. Experimental study of the material and bond properties of frost-damaged concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2011, 41(3): 244-254
- [4] 张楚汉,金峰. 岩石和混凝土离散-接触-断裂分析 [M]. 北京:清华大学出版社,2008.
- [5] CEB-FIP Model Code 1990 [S]. London: Thomas Telford, 1993.
- [6] DIANA Finite Element Analysis Users's Manual Release 9.4 [M]. Delft: TNO Building and Construction Research, 2010.
- [7] 徐有邻. 变形钢筋-混凝土粘结锚固性能的试验研究 [D]. 北京:清华大学,1990.
- [8] 徐港,卫军,王青. 锈蚀变形钢筋与混凝土粘结应力模型研究 [J]. 工程力学, 2008, 25(12): 123-126.
XU GANG, WEI JUN, WANG QING. Modelling bond strength of corroded deformed bar in concrete [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(12): 123-126.
- [9] WANG X H, LIU X L. Modelling effects of corrosion on cover cracking and bond in reinforced concrete [J]. Magazine of Concrete Research, 2004, 56(4): 191-199.
- [10] 赵卫平,肖建庄. 带肋钢筋与混凝土间粘结滑移本构模型 [J]. 工程力学, 2011, 28(4): 164-171.
ZHAO WEI-PING, XIAO JIAN-ZHUANG. On bond-slip constitutive model between ribbed steel bars and concrete [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(4): 164-171.
- [11] 赵娟,邹超英. 冻融作用后钢筋与混凝土之间粘结性能研究 [J]. 沈阳建筑大学学报, 2007, 23(5): 719-722
ZHAO JUAN, ZOU CHAO-YING. Study on bonding property between steel rebars and concrete caused by freeze-thaw action [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University, 2007, 23(5): 719-722.
- [12] 何世钦,贡金鑫,金峰,等. 锈蚀与冻融循环下钢筋与混凝土粘结退化性能 [J]. 水力发电学报, 2009, 28(2): 61-65.
HE SHI-QIN, GONG JIN-XIN, JIN FENG, et al. Deterioration characteristics of the bond between reinforcement and concrete subjected to freezing-thawing cycles and steel corrosion [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(2): 61-65.
- [13] 冀晓东,赵宁,宋玉普. 冻融循环作用后变形钢筋与混凝土粘结性能退化研究 [J]. 工业建筑, 2010, 40(1): 87-91.
JI XIAO-DONG, ZHAO NING, SONG YU-PU. Experimental study on bond behavior's deterioration between deformed steel bar and concrete after freezing and thawing [J]. Industrial Construction, 2010, 40(1): 87-91.
- [14] 艾天成. 盐冻环境下钢筋与混凝土粘结锚固性能研究 [D]. 湖北宜昌:三峡大学,2011.
- [15] 段安. 受冻融混凝土本构关系研究和冻融过程数值模拟 [D]. 北京:清华大学,2009.
- [16] 冀晓东. 冻融后混凝土力学性能及钢筋混凝土粘结性能的研究 [D]. 辽宁大连:大连理工大学,2007.
- [17] 覃丽坤,宋玉普. 海水中冻融循环后的混凝土在非比例加载下的双轴受压性能研究 [J]. 工程力学, 2009, 26(1): 155-159.
QIN LI-KUN, SONG YU-PU. Biaxial compressive behavior of concrete subjected to non-proportional loads after suffering cycles of freezing and thawing in seawater [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(1): 155-159.
- [18] GB50010—2010 混凝土结构设计规范 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [19] 李金玉,曹建国. 混凝土冻融破坏机理的研究 [J]. 水利学报, 1999(1): 41-49.
LI JIN-YU, CAO JIAN-GUO. Study on the mechanism of concrete destruction under frost action [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999(1): 41-49.
- [20] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制 [M]. 北京:中国电力出版社,1999.
- [21] 顾祥林. 混凝土结构基本原理 [M]. 2版. 上海:同济大学出版社,2011.