

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2014.03.014

# 盐冻环境下钢筋混凝土梁抗弯性能试验研究

徐 港<sup>1,2</sup>, 李运攀<sup>1,2</sup>, 潘 琪<sup>1,2</sup>, 谢晓娟<sup>1</sup>

(1. 三峡大学 土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002;  
2. 三峡地区地质灾害与生态环境湖北协同创新中心, 湖北 宜昌 443002)

**摘 要:** 试验研究了盐冻环境下钢筋混凝土梁抗弯性能的退化规律, 分析比较了完好梁和经历 25、50、75 及 100 次盐冻融循环作用梁的承载力和变形性能。结果表明: 受冻梁截面混凝土应变仍满足平截面假定, 受力特征与完好梁相似; 影响盐冻融环境下梁承载力的主要因素是受压区混凝土保护层的剥落, 其次是混凝土强度的降低, 而钢筋与混凝土粘结性能退化的影响并不显著; 混凝土强度降低、保护层损伤及粘结性能退化均是冻融环境下混凝土梁变形增大的重要因素, 梁刚度的降低程度除与冻融次数相关外, 还受冻融损伤位置和持荷水平影响。

**关键词:** 钢筋混凝土梁; 盐冻; 耐久性; 抗弯性能

**中图分类号:** TU375.02    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1674-4764(2014)03-0086-06

## Experimental Analysis on Flexural Performance of Reinforced Concrete Beam in Salt-frost Environment

Xu Gang<sup>1,2</sup>, Li Yunpan<sup>1,2</sup>, Pan Qi<sup>1,2</sup>, Xie Xiaojuan<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering & Architecture, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, P. R. China;  
2. Collaborative Innovation Center for Geo-Hazard and Eco-Environment in Three Gorges Area, Yichang 443002, Hubei, P. R. China)

**Abstract:** Under the salt frost environment, the flexural behavior of reinforced concrete was studied. The bearing capacity and deformation performance of the beams were analyzed by comparing with the reference beam (undamaged) and beams subjected to 25, 50, 75 and 100 salt freeze-thaw cycles respectively. The results showed the plane section hypothesis still was satisfied for the concrete strains of frost beam section, and the mechanical characteristics of frost beam was similar to reference; The main reason to affect the beam bearing capacity under salt freeze-thaw environment was the concrete cover scaling in the compressive zone. Secondly, it was the reduction in concrete strength, while the degradation of bond properties between rebar and concrete was not a dominated factor; the deformations of concrete beam increased mainly due to the reduction in concrete strength, the damage of concrete cover and the degradation of bond properties. In addition to the number of freeze-thaw cycles, the positions of freeze-thaw damage and the load level affected the degree of reduction in beam stiffness.

**Key words:** reinforced concrete beam; salt-frost; durability; flexural performance

冻融环境下构件抗力性能的退化并不仅取决于材料力学性能的降低, 冻融引起的构件截面尺寸减小以及钢筋混凝土间粘结性能劣化也是重要原因。近

年来, 针对混凝土构件抗冻性的研究正持续展开<sup>[1-11]</sup>, 但在相关试验研究成果中, 由于受试验设备制约, 所采用试件尺寸普遍较小, 多限于材料试验试件尺度,

**收稿日期:** 2013-01-30

**基金项目:** 国家自然科学基金(51379111, 51109121); 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资助项目

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

尺寸效应少有考虑;而在理论和仿真分析成果中只考虑了混凝土强度和粘结性能退化对构件抗力的影响,较少注意到构件截面冻融破损产生的影响,更少关注到水冻融和盐冻融环境下截面破损程度的不同。为此,本文采用特制大型冻融试验机进行了较大尺寸混凝土梁的盐冻融试验研究,进一步探究了随盐冻融次数增加混凝土梁抗力性能的演变规律,为相应环境下混凝土结构安全评估和耐久性设计提供参考。

## 1 试验设计

### 1.1 试件设计

同批设计、浇筑了5根钢筋混凝土试验梁,混凝土设计强度为C25,纵向钢筋保护层厚度为20 mm,试件尺寸及配筋情况如图1所示。

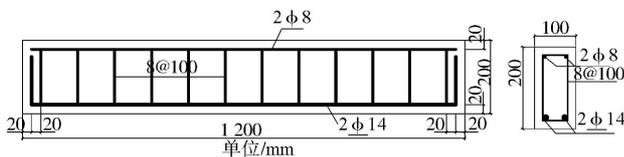


图1 试验梁配筋及截面详图

### 1.2 材料及其力学性能

水泥:三峡牌P·C 32.5复合硅酸盐水泥,其各项指标均达国家标准;石:碎石,粒径5~20 mm,连续级配;砂:河砂,细度模数1.86,属Ⅲ区级配,细砂;水:自来水。混凝土配合比为:水:水泥:砂:石子=1.00:2.04:3.06:6.21。试验梁进行冻融试验前实测其伴随立方体试块抗压强度平均值为40 MPa。纵向受拉钢筋为HRB335变形钢筋,直径14 mm,屈服强度实测值351 MPa;架立筋和箍筋均采用直径为8 mm的HPB235光圆钢筋,屈服强度实测值为355 MPa。

### 1.3 冻融试验

冻融循环采用定制的TDRF-2大型混凝土快速冻融试验机进行(图2),冻融介质为3%的NaCl溶液,试验方法采用《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009)<sup>[12]</sup>建议的快冻法,冻融循环转换通过监测标准冻融试件(100 mm×100 mm×400 mm)中心温度控制。

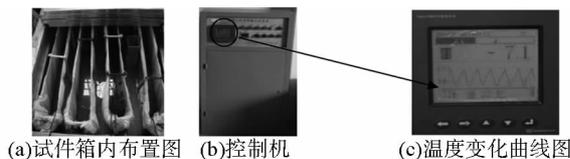


图2 混凝土快速冻融试验机

在冻融试验前,将标准试件和试验梁置于冻融介质中浸泡4 d,然后启动试验机开始冻融循环试

验。达到预期的25、50、75、100次冻融循环后,依次取出试验梁进行承载力试验。

### 1.4 加载试验

试验梁承载力试验采用课题组发明的钢筋混凝土梁反力加载装置<sup>[13]</sup>进行,试验时在梁跨中粘贴应变片监测截面应变,支座和跨中设置千分表测量构件挠度值,如图3所示。加载制度参考《混凝土结构试验方法标准》(GB 50152—92)<sup>[14]</sup>,试验过程中荷载大小通过拉压力传感器连接XL 2101G高速60点静态应变采集仪由电脑软件控制,每级荷载下的混凝土应变值通过导线连接应变片至XL 2101G采集仪获得。

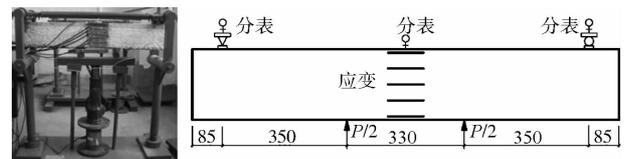


图3 试验梁加载图

## 2 梁盐冻破坏特征

各试验梁冻损形态如图4所示,随着冻融循环次数的增加,梁破坏程度逐渐增大:25次循环后,梁表面变得粗糙,局部有少量砂浆脱落;50次后,梁表面砂浆脱落严重,粗骨料明显暴露,部分箍筋外露;75次循环后,梁两端边角脱落明显,箍筋外露数量增多,梁端纵筋外露;100次后,梁底面保护层基本脱落,且粗骨料周围出现明显裂纹,箍筋大部分外露,纵筋外露长度达3/4梁长,损伤严重。

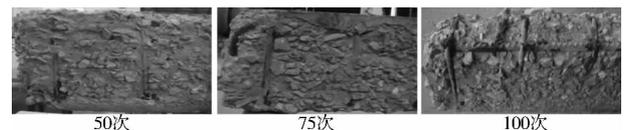


图4 不同冻融循环次数后梁损坏情况

试验还发现,同根梁不同部位的冻融破坏程度并不均匀,所有梁都是靠近冻融箱底的面损伤较严重,其原因一方面可能是由于试验尺寸较大,不同部位升降温存在滞后性导致,而另一方面也可能是由于溶液长期静置后沿截面高度盐浓度分布不均匀造成的,具体原因尚需进一步研究。由于试验前并没有考虑到这一因素,冻融试验结束后发现75次冻融试验梁的受拉与受压区放置方向与其他梁相反,即冻融循环75次梁损伤严重的区域为抗压区,而其他梁为受拉区(图4)。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 抗力性能

试验表明,冻损梁截面混凝土应变仍满足平截

面假定,以100次冻融循环作用梁为例,梁截面平均应变沿高度仍近似呈线性分布,如图5所示。而且,经历不同次数盐冻循环作用梁的破坏特征也与完好梁类似,均属典型的适筋梁弯曲破坏,各梁极限荷载实测值如表1所示。

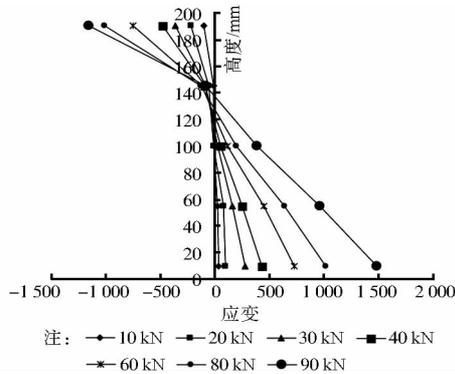


图5 100次冻融梁截面混凝土应变分布图

表1 试验梁承载力

冻融循环/次	极限荷载/kN
0	108
25	110
50	103
75	96
100	102

### 3.2 变形特征

完好梁及经历25、50、75和100次盐冻融循环作用后梁的荷载挠度关系曲线如图6所示。可见冻融梁与完好梁的变形特征相近,荷载-挠度曲线仍可分为3个阶段:1)弹性阶段;2)带裂缝工作阶段;3)屈服阶段。

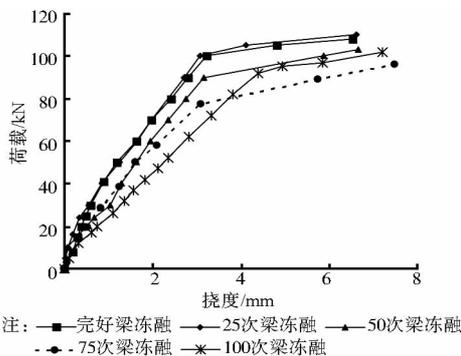


图6 荷载-挠度关系曲线

### 3.3 结果分析

冻融循环作用造成钢筋混凝土构件抗力性能退化的主要因素可归纳为:1)混凝土强度降低和内部缺陷增多;2)构件截面的完整性遭到破坏,截面积和惯性矩减小;3)钢筋与混凝土间粘结性能退化。但

各因素对梁受力性能的影响程度并不相同。

3.3.1 对承载力的影响 普通混凝土单筋矩形截面梁承载力计算公式如式(1)和(2)。

$$f_y A_s = f_c b x \quad (1)$$

$$M_u = f_y A_s (h_0 - \frac{x}{2}) \quad (2)$$

式中:  $M_u$  为截面抵抗弯矩;  $f_y$  为钢筋抗拉强度;  $f_c$  为混凝土轴心抗压强度;  $b$  为截面宽度;  $A_s$  为纵向受拉钢筋的面积;  $h_0$  为截面有效高度;  $x$  为混凝土计算受压区高度。

将式(1)代入式(2)整理后,得式(3)。

$$M_u = f_y A_s (h_0 - \frac{f_y A_s}{2 f_c b}) \quad (3)$$

设完好梁混凝土轴心抗压强度为  $f_{c0}$ , 冻融作用后降为  $f_{cd}$ ,  $\Delta f_c = (f_{c0} - f_{cd})/f_{c0}$  为混凝土强度退化率;  $M_{u0}$ 、 $M_{ud}$  分别为冻融前后混凝土梁的抵抗弯矩,  $\Delta M_{uc} = (M_{u0} - M_{ud})/M_{u0}$  为抗弯承载力退化率。由式(3)可得  $\Delta M_{uc}$  与  $\Delta f_c$  间满足式(4)。

$$\Delta M_{uc} = \frac{M_{u0} - M_{ud}}{M_{u0}} = \frac{(f_y A_s)^2 \cdot \frac{f_{c0} - f_{cd}}{f_{c0} f_{cd}}}{f_y A_s (h_0 - \frac{f_y A_s}{2 f_{c0} b})} = \frac{f_y A_s}{2b} \cdot \frac{1}{f_{cd} h_0 (1 - \frac{f_y A_s}{2 f_{c0} b h_0})} \cdot \frac{f_{c0} - f_{cd}}{f_{c0}} = \frac{\rho f_y}{2 f_{cd} (1 - \frac{f_y \rho}{2 f_{c0}})} \cdot \Delta f_c = k_1 \Delta f_c \quad (4)$$

同理,设完好梁混凝土截面有效高度为  $h_0$ , 冻融作用后降为  $h_{0d}$ , 则有效高度减小率为  $\Delta h = (h_0 - h_{0d})/h_0$ , 引起的抗弯承载力退化率  $\Delta M_{uh} = (M_{u0} - M_{uh})/M_{u0}$  满足如下关系,

$$\Delta M_{uh} = \frac{1}{1 - \frac{f_y \rho}{2 f_{c0}}} \cdot \Delta h = k_2 \Delta h \quad (5)$$

式中:  $\rho$  为梁的配筋率,  $\rho = A_s/bh_0$ ;  $k_1$  为混凝土强度变化率影响系数;  $k_2$  为截面有效高度变化率影响系数。

在冻融梁保持适筋破坏特征条件下,混凝土强度的最低值  $f_{cdmin}$  可由式(1)取  $x = x_b$  确定,即  $f_{cdmin} = \frac{f_y A_s}{x_b b} = \frac{f_y A_s}{\xi_b h_0 b} = \frac{f_y \rho}{\xi_b}$ , 式中  $x_b$  为适筋界限梁计算受压区高度,  $\xi_b = x_b/h_0 < 1$ , 从而有  $\frac{k_1}{k_2} = \frac{f_y \rho}{2 f_{cd}} <$

$\frac{f_y \rho}{2 f_{cdmin}} = \frac{\xi_b}{2} < 1$ , 恒成立。这说明,在混凝土强度降低不是很大 ( $f_{cd} \leq x_0/x_b f_c$ ,  $x_0$  为完好梁计算受压区高度) 冻融梁仍保持为适筋破坏时,截面有效高度减小率较混凝土强度退化率对其承载力影响更显著。

综上,如果冻融环境下混凝土强度和截面有效

高度的降幅是相近的,那么无疑截面高度变化是冻融梁抗弯承载力的更主要影响因素。然而,水冻融和盐冻2类环境下混凝土的强度退化和表面剥蚀的程度是不相同的,所以它们对构件承载力的影响程度也并不相同。文献[15]对比研究不同水灰比混凝土试件的盐冻和水冻融损伤特征,由文献[15]表3数据推算可得相同冻融次数盐冻试件的相对质量损失率为水冻融试件的5~23倍,且该比值随冻融次数增加而急剧增加。而据文献[16-17],盐冻与水冻融后普通混凝土强度可分别由式(6)和(7)确定,如将本文混凝土抗压强度分别代入式(6)和(7),比较相同冻融次数作用后的混凝土强度可知,盐冻较水冻融作用后混凝土强度有0~40%左右的降幅,且

也是随冻融次数增大降幅。

$$\frac{f_{cd}}{f_{c0}} = 1 - 0.005614N_{\text{salt}} \quad (6)$$

$$\frac{f_{cd}}{f_{c0}} = 1 - 200f_{cu}^{-3.0355} \cdot N_{\text{water}} \quad (7)$$

式中,  $f_{cd}$  为冻融后混凝土轴心抗压强度;  $f_{c0}$  为冻融循环前混凝土轴心抗压强度;  $N_{\text{salt}}$  为盐冻融循环次数;  $N_{\text{water}}$  为水冻融循环次数。

在冻融环境下,如果仅考虑混凝土强度退化对梁承载力的影响,且忽略沿截面高度冻融损伤的不均匀性,只需据式(6)或(7)求得不同冻融次数作用后的混凝土轴心抗压强度,再代入式(1)、(2)即可求得相应冻融次数作用后梁的承载力(表2)。

表2 不同冻融循环次数后强度对梁抗弯承载力的影响

冻融次数	混凝土轴心抗压强度/MPa		混凝土强度退化率/%		极限荷载 $P_u$ /kN		抗弯承载力退化率/%	
	盐冻融	水冻融	盐冻融	水冻融	盐冻融	水冻融	盐冻融	水冻融
0	30.40	30.40	0.00	0.00	95.81	95.81	0.00	0.00
25	26.13	28.32	14.05	6.84	94.02	95.00	1.87	0.85
50	21.87	26.23	28.06	13.72	91.53	94.07	4.47	1.82
75	17.60	24.15	42.11	20.56	87.84	92.97	8.32	2.96
100	13.33	22.07	56.15	27.40	81.78	91.67	14.64	4.32

同理,如果仅考虑截面有效高度降低对梁承载力的影响,假设冻融损伤仅发生在试件受压区,而截面有效高度随冻融循环次数增加线性减小,且按最不利情况取水冻融引起的截面损失为盐冻融环境的1/5,并参考图4设100次盐冻融作用后受压区混凝土完全剥落,则可得不同冻融次数作用后截面的有效高度,将其分别代入式(1)、(2)便可求得相应受冻梁的承载力(表3)。

对比分析表2和3中数据可知:1)冻融环境下混凝土强度退化率远高于构件截面有效高度减小

率;2)水冻融环境中,相同冻融次数下,混凝土强度退化较截面有效高度减小引起的抗弯承载力退化率更高,说明前者是影响梁承载力下降的首要因素;3)盐冻融环境中,相同冻融次数下,截面有效高度减小较混凝土强度退化引起的抗弯承载力退化率普遍偏高,仅个别情况例外,如果考虑到构件冻融的非均匀性,即截面不同部位混凝土强度并不是同时达到最低,以及截面宽度的损失,说明受压区混凝土剥落对梁承载力的影响更为主要。

表3 不同冻融循环次数后有效高度对梁抗弯承载力的影响

冻融次数	梁截面有效高度/mm		有效高度减小率/%		极限荷载 $P_u$ /kN		抗弯承载力退化率/%	
	盐冻融	水冻融	盐冻融	水冻融	盐冻融	水冻融	盐冻融	水冻融
0	173	173	0.00	0.00	95.81	95.81	0.00	0.00
25	168	172	2.89	0.58	92.72	95.19	3.23	0.65
50	163	171	5.78	1.16	89.64	94.58	6.44	1.28
75	158	170	8.67	1.73	86.55	93.96	9.67	1.93
100	153	169	11.56	2.31	83.47	93.34	12.88	2.58

关于粘结性能退化对冻融梁承载力的影响,已有研究表明在保护层剥落前影响甚微<sup>[9]</sup>,保护层局部剥落后可视为局部无粘结梁进行分析,而据文献[18-19]试验研究结果,在梁端钢筋锚固良好条件下局部无粘结梁的承载力并不会有明显降低。分析

表1数据也可得到充分说明,比较75次和100次冻融梁,虽然后者混凝土强度降低更多,且受拉区保护层局部剥落钢筋混凝土粘结性能明显劣化,可是承载力并未显著下降,而前者受拉区钢筋粘结良好,但承载力却有较明显下降,如忽略同批试验梁的个体

差异,原因主要是由于其受压区保护层受冻剥蚀严重导致梁有效高度减小造成的。

3.3.2 对变形性能的影响 普通混凝土梁的抗弯刚度,在梁受荷开裂前,即第 I 阶段,可由式(8)计算,进入带裂缝工作阶段后,即第 II 阶段,由式(9)确定<sup>[20]</sup>。

$$B_s = 0.85E_c I_0 \quad (8)$$

$$B_s = \frac{E_s A_s h_0^2}{\frac{\psi}{\eta} + 0.2 + \frac{6\alpha_E \rho}{1 + 3.5\gamma_f}} \quad (9)$$

式中:  $E_c$ 、 $I_0$ 、 $B_s$ 、 $E_s$ 、 $A_s$ 、 $h_0$ 、 $\psi$ 、 $\eta$ 、 $\alpha_E$ 、 $\rho$  和  $\gamma_f$  的含义详见《混凝土结构设计规范》<sup>[20]</sup>。

对冻融梁而言,随冻融次数增加,混凝土强度降低,保护层内裂缝增多,引起弹模下降,截面惯性矩( $I_0$ )减小,由式(8)可知,在第 I 阶段,随冻融次数增加梁的刚度将逐渐降低,如图 6 所示。至于图 6 中 75 次冻融梁刚度下降较小的原因可能同样是由于冻融损伤主要发生在受压区造成的,因为在荷载作用下,受压区保护层内的损伤裂缝将趋于闭合,对  $I_0$  的影响是有利的。

梁的工作性态进入第 II 阶段后,假设冻融梁的刚度仍可由式(9)近似计算,由于粘结性能随冻融次数增加逐渐下降,导致受拉钢筋应变趋于均匀变化,应变不均匀系数( $\psi$ )逐渐增大,并趋于 1,而钢筋与混凝土的弹模比( $\alpha_E$ )也逐渐增大,致使梁的刚度随冻融次数增加而下降。但 75 次冻融梁刚度的退化规律较其他梁仍有所不同,表现为前期退化较缓,而后期迅速(图 6),主要还是由于受拉区冻融损伤较轻的缘故,因为混凝土抗拉强度较高,当荷载不大(约极限荷载 0.5 倍以内)时,受力裂缝发展较缓,且钢筋混凝土粘结性能保持良好,所以刚度降低不多,但随着荷载增加,受力裂缝逐渐向梁受压区发展,受压区高度不断减小,而受压区本身又冻损严重,导致混凝土承压性能迅速下降,引起刚度急剧退化。

综上,随冻融次数增加混凝土强度降低、保护层损伤及粘结性能退化均是导致梁变形增大的重要因素,为保证梁的适用性更应注重受拉区的防冻。

3.3.3 讨论 据前述分析,不难发现影响冻融梁抗力性能的诸因素在其受荷的不同阶段所起作用并不相同,构件抗力性能的降低并不仅仅取决于材料力学性能的退化,且二者并不一定总是在正相关,还受损伤位置的影响。考虑到在役结构受冻融作用往往是非均匀的,因此目前基于材料层次上的冻融循环试验评定构件的抗冻性还需进一步验证。

混凝土梁的抗弯承载力受截面有效高度减小和混凝土强度退化影响显著,相同冻融次数下,对于截面尺寸、材料组成不同的梁,即便二者材料强度、配

筋方式以及试验方法相同,但承载力退化率并不具有可比性。如文献[7]和[8]所采用试件的混凝土强度相近,且冻融试验均为快冻法,而试件尺寸分别为 100 mm×150 mm×700 mm 和 100 mm×100 mm×1100 mm。文献[8]研究表明,冻融梁与完好梁相比,经受 25、50、75 次冻融循环作用后极限承载力分别降低 5.2%、13.8%、25.7%;而文献[7]的结论是,经过 400 次冻融和侵蚀交替作用后 Beam-0 梁与完好梁 Beam-Ref 的极限荷载相近,可见二者结果相差甚远。原因可能是由于文献[7]中混凝土掺有缓凝高效减水剂和粉煤灰,不仅减缓了混凝土强度的退化,而且还增强了其抗剥蚀性,致使 Beam-0 梁虽然经历了 400 次冻融循环作用,但混凝土强度退化和截面有效高度减小率并不大,承载力下降不明显;而文献[8]的试验梁未掺任何外加剂和掺和料,混凝土强度退化率及抗剥蚀性均较文献[7]差,而截面高度又小,导致截面有效高度减小率也远大于文献[7],致使经历冻融次数不多时承载力就明显下降。因此,进行构件的抗冻试验研究时必须考虑损伤相似性的问题,如仅简单地以冻融循环次数为变量表征构件损伤程度参考价值不大,唯有通过合理构建损伤变量才可能揭示其劣化机理<sup>[21]</sup>。

冻融及盐冻作用后钢筋混凝土梁承载力的一般性评估,可以不计粘结性能退化影响,在考虑相应冻融次数作用后的混凝土强度和截面有效高度的基础上,可利用现行混凝土结构设计规范公式计算。不过,定量揭示破坏机理的抗力分析模型尚需进一步研究,模型中除需考虑前述所有影响因素外,还应注意冻融损伤是由表及里的,距构件表面深度不同混凝土强度的退化程度不相同的特性<sup>[9]</sup>,应依据混凝土强度受损程度分层变化特征分别选取相应的本构方程和破坏准则。

## 4 结 论

1) 盐冻融环境下普通混凝土构件表面剥蚀现象严重,且随冻融次数增加保护层剥落程度加剧;沿截面高度混凝土强度劣化程度不同,但受冻梁截面混凝土应变仍满足平截面假定。

2) 冻融环境下,钢筋混凝土粘结性能退化对梁承载力影响较小,盐冻融环境下影响梁抗弯承载力的主要因素依次是受压区混凝土的剥落和混凝土强度的降低,与水冻融环境相反。

3) 冻融环境下,随冻融次数增加,混凝土强度降低、保护层损伤及粘结性能退化均是导致梁变形增大的重要因素,而梁刚度降低程度除与冻融次数相关外,还受冻融损伤位置和持荷水平影响。

4) 混凝土构件的抗冻性受试件尺寸、混凝土强

度退化率影响显著,仅以冻融循环次数表征其损伤程度不足以揭示构件的冻融损伤机理。

#### 参考文献:

- [1] Shih T S, Lee G C. Effect of freezing cycles on bond strength of concrete [J]. Journal of Structural Engineering, 1988, 114(3): 717-726.
- [2] Petersen L, Lohaus L, Polak M A. Influence of freezing-and-thawing damage on behavior of reinforced concrete elements [J]. ACI Materials Journal, 2007, 104(4): 369-378.
- [3] Hanjaria K Z, Utgenanntb P, Lundgren K. Experimental study of the material and bond properties of frost-damaged concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2011, 41(3): 244-254.
- [4] 刁波,孙洋,马彬.混合侵蚀和冻融交替作用下持续承载钢筋混凝土梁试验[J].建筑结构学报,2009,30(Sup 2):281-286.  
Diao B, Sun Y, Ma B. Experiments of persistent loading reinforced concrete beams under the alternative actions of a mixed aggressive solution and freeze-thaw cycles [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30 (Sup 2): 281-286.
- [5] 刁波,孙洋.混合侵蚀与冻融交替作用下持续承载钢筋混凝土偏压构件试验[J].建筑结构学报,2009,30(Sup 2):292-297.  
Diao B, Sun Y. Experiments of reinforced concrete columns with eccentric compressive persistent loading under alternative actions of a mixed aggressive solution and freeze-thaw cycles [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(Sup 2): 292-297.
- [6] 杜永峰,乔琪.化冰盐对钢筋混凝土梁承载力影响的研究[J].低温建筑技术,2010(7):1-3.  
Du Y F, Qiao Q. Experimental study on deterioration of load bearing capacity of reinforced concrete bridge due to deicing salt [J]. Technology of Low Temperature Architecture, 2010 (7): 1-3.
- [7] 刁波,孙洋,叶英华.持续承载钢筋混凝土梁的冻融循环试验[J].中南大学学报:自然科学版,2011,42(3):785-790.  
Diao B, Sun Y, Ye Y H. Experiments of persistent loading reinforced concrete beams with freeze-thaw cycles [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2011, 42(3): 785-790.
- [8] 杜晓雷,窦立军,王庆华,等.钢筋混凝土梁在冻融锈蚀环境下的劣化规律研究[J].长春工程学院学报:自然科学版,2010,11(4):17-20.  
Du X L, Dou L J, Wang Q H, et al. Study on the degradation law of reinforced concrete beams under freeze-thaw and corrosion [J]. Journal of Changchun Institute of Technology: Natural Science Edition, 2010, 11(4): 17-20.
- [9] 徐港,谢晓娟,艾天成,等.盐冻环境下钢筋混凝土梁抗弯性能仿真分析[J].土木建筑与环境工程,2012,34(2):63-68.  
Xu G, Xie X J, Ai T C, et al. Simulation analysis of flexural performance of reinforced concrete beam in salt-frost environment [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2012, 34(2): 63-68.
- [10] 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 Y Q, Yu H F, Wang J C. Study of salt-freezing-resistance of concrete member [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2010, 29(2): 345-351.
- [11] 叶英华,马彬,孙洋.盐冻损伤钢筋混凝土纯弯构件截面非线性分析[J].交通运输工程学报,2009,9(6):16-20.  
Ye Y H, Ma B, Sun Y. Section nonlinear analysis of salt-freezing reinforced concrete pure bending component based on damage theory [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009, 9(6): 16-20.
- [12] 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,2009.
- [13] 徐港,梁桂林,王青,等.混凝土梁反向加载试验装置[P].中国,ZL201220122497.0,2012.
- [14] 中华人民共和国建设部. GB 50152-92 混凝土结构试验方法标准[S].广州:中山大学出版社,1992.
- [15] 徐小巍,金伟良,赵羽习,等.不同环境下普通混凝土抗冻性试验研究及机理分析[J].混凝土,2010(2):21-24.  
Xu X W, Jin W L, Zhao Y X, et al. Experimental study and mechanism analysis on frost resistance of normal performance concrete under different environments [J]. Concrete, 2010 (2): 21-24.
- [16] 覃丽坤,宋玉普,王玉杰,等.冻融循环对海水中混凝土抗压性能的影响[J].混凝土,2004(1):16-18.  
Qin L K, Song Y P, Wang Y J, et al. The influence of cycles of freezing and thawing on the compressive property of concrete in seawater [J]. Concrete, 2004 (1): 16-18.
- [17] 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.
- [18] 王庆霖,池永亮,牛获涛.锈后无粘结钢筋混凝土梁的模拟试验与分析[J].建筑结构,2001,31(4):51-53.  
Wang Q L, Chi Y L, Niu D T. Analysis and simulation tests on severely-corroded reinforced concrete beams [J]. Building Structures, 2001, 31(4): 51-53.
- [19] 何伟业,宋晓冰.局部无粘结钢筋混凝土梁的承载力分析[J].工业建筑,2010,40(Sup 1):146-152.  
He W Y, Song X B. Strength capacity analysis of partially unbonded RC beam [J]. Industrial Construction, 2010, 40(Sup 1): 146-152.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50010-2010 混凝土结构设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [21] 张云清.氯化物盐冻作用下混凝土构件的耐久性评估与服役寿命设计方法[D].南京:南京航空航天大学,2011.