

文章编号:1673-2049(2008)03-0066-07

# 再生混凝土碳化模型与结构耐久性设计

肖建庄,雷 斌

(同济大学 建筑工程系,上海 200092)

**摘要:**通过分析现有模型并结合各国试验结果,建立了再生混凝土碳化深度的计算模型。在此基础上提出了极限状态法和分项系数法2种再生混凝土结构耐久性的设计方法,并对再生混凝土梁使用寿命进行了可靠度分析。结果表明:增大再生混凝土强度等级和再生混凝土保护层厚度可以明显提高再生混凝土构件的耐久性;受力状态、钢筋位置对再生混凝土构件的耐久性有重要影响。综合考虑再生混凝土中钢筋开始锈蚀对结构使用功能的影响程度和再生混凝土的不同受力状态,提出了上海地区再生混凝土构件中钢筋的最小保护层厚度。

**关键词:**再生混凝土;碳化模型;结构耐久性设计;可靠度分析;最小保护层厚度

**中图分类号:**TU528.57 **文献标志码:**A

## Carbonation Model and Structural Durability Design for Recycled Concrete

XIAO Jian-zhuang, LEI Bin

(Department of Architectural Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Based on the investigation of available achievements on carbonation of recycled concrete and concrete carbonation test data at home and abroad, the calculation model of recycled concrete carbonation depth was established and the limit state method and the partial safety factor method for recycled concrete structures were put forward. The reliability analysis of service life for recycled concrete beams was undertaken. Results show that the increase of compressive strength grades of recycled concrete and thickness of recycled concrete cover can improve the durability life of recycled concrete structures remarkably; while stress state of recycled concrete and the placement of reinforcing bars will have significant effects on the durability life of recycled concrete structures. Comprehensively considering the effect extent of carbonation-initiated corrosion of reinforcement on the functionality of recycled concrete structures and the different stress states of recycled concrete elements, the minimal thickness of recycled concrete cover of reinforcement in recycled concrete elements was proposed in Shanghai area.

**Key words:** recycled concrete; carbonation model; structural durability design; reliability analysis; minimal thickness of recycled concrete cover of reinforcement

## 0 引言

再生混凝土作为一种新型的生态混凝土,正日

益引起人们的重视。已有的研究表明<sup>[1-9]</sup>,再生混凝土材料的抗碳化性能低于同水灰比或同配合比下的普通混凝土材料的抗碳化性能。然而,关于再生混

凝土碳化深度的计算模型及耐久性设计方面的研究还未见诸文献。本文中笔者通过分析现有模型并结合大量试验结果,建立了再生混凝土碳化深度的计算模型,并以此对再生混凝土结构的耐久性设计进行了探讨,以期对再生混凝土梁的耐久性设计提供理论依据,并为推广再生混凝土在结构工程中的应用奠定基础。

## 1 碳化模型

从 20 世纪 60 年代起,各国提出了很多种混凝土碳化深度的计算模型<sup>[10]</sup>。这些模型基本上可以归纳为 3 种类型:基于 Fick 扩散定律的理论模型;基于碳化试验结果统计的经验模型;理论与经验相结合的半经验半理论模型。理论模型的优点在于模型的物理意义明确,但存在着一些参数不易确定,不便于工程应用等不足;经验模型的预测效果较好,比较方便工程应用,但也存在着受适用条件限制和缺乏充分理论依据等不足。结合理论分析和试验研究的半经验半理论模型,具有物理意义明确和便于工程应用的优点,应是比较理想的模型。下面基于相关模型和试验数据的分析,提出再生混凝土半经验半理论碳化模型和经验碳化模型。

### 1.1 实用数学模型

在张誉等<sup>[11]</sup>提出的混凝土碳化数学模型基础上,引入再生粗集料影响因子,基于各国学者共计 28 组的试验数据回归得到的再生混凝土的碳化深度数学模型为

$$x_c = 839 g_{RC} (1-R)^{1.1} \sqrt{\frac{W/(\gamma_c C) - 0.34}{\gamma_{HD} \gamma_c \times 8.03 C}} n_0 t \quad (1)$$

式中: $x_c$  为碳化深度; $R$  为相对湿度; $W$  为单位体积混凝土的用水量; $C$  为单位体积混凝土的水泥用量; $\gamma_c$  为水泥品种修正系数,波特兰水泥取  $\gamma_c = 1$ ,其他品种水泥取  $\gamma_c = 1 - M$ , $M$  为掺和料质量分数; $\gamma_{HD}$  为水泥水化程度修正系数,超过 90 d 养护取 1,28 d 养护取 0.85,中间养护龄期按线性插入取值; $n_0$  为  $CO_2$  的体积浓度; $t$  为碳化时间; $g_{RC}$  为再生粗集料影响系数,再生粗集料的取代率为 0 时,取  $g_{RC} = 1$ ,取代率为 100 时,取  $g_{RC} = 1.5$ ,中间取代率按线性插入取值。该模型的符合程度较好,试验值与计算值之比(本文中定义为碳化深度不定性系数)的均值、变异系数分别为 0.999、0.344。

### 1.2 经验模型

由于原有建筑物的水灰比、水泥用量等资料往往难以获得,而混凝土强度在工程检测中容易获得,

与水灰比也具有良好的相关性,而且在一定程度上反映了施工因素的影响,因此在《混凝土结构耐久性评定标准》(送审稿)中给出了以混凝土强度为主要参数的混凝土碳化深度的经验模型。《混凝土结构耐久性评定标准》(送审稿)中给出的普通混凝土的碳化模型,其试验值与计算值之比的均值和方差分别为 0.996、0.356。本文中基于各国学者共计 28 组的试验数据回归得到的再生混凝土的碳化深度数学模型为

$$x_c = K_{CO_2} K_{kl} K_{ks} T^{0.25} R^{1.5} (1-R) \cdot \left( \frac{230}{f_{cu}^{RC}} + 2.5 \right) \sqrt{t} \quad (2)$$

式中: $K_{CO_2}$  为  $CO_2$  浓度影响系数, $K_{CO_2} = \sqrt{\frac{C_0}{0.2}}$ , $C_0$  为  $CO_2$  体积浓度; $K_{kl}$  为位置影响系数,构件角区取  $K_{kl} = 1.4$ ,非角区取  $K_{kl} = 1.0$ ; $K_{ks}$  为工作应力影响系数,受压时取  $K_{ks} = 1.0$ ,受拉时取  $K_{ks} = 1.7$ ; $T$  为环境温度; $f_{cu}^{RC}$  为再生混凝土抗压强度平均值。该模型的符合程度较好,试验值与计算值之比的均值、变异系数分别为 0.973、0.320。

## 2 耐久性设计

再生混凝土结构采用耐久性极限状态法进行耐久性设计的基本步骤为:首先,分析结构所受的环境作用荷载与耐久性退化机理,选择相应的耐久性计算模型;然后,根据建筑结构构件的重要程度、荷载与环境作用等具体情况,确定耐久性极限状态、目标使用年限、目标可靠度;最后,采用计算模型进行耐久性设计。为了便于工程应用,与现行《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)<sup>[12]</sup>相一致,引入分项系数的概念,将耐久性极限状态法转化为更为实用的耐久性分项系数法。

### 2.1 耐久性极限状态法

#### 2.1.1 再生混凝土碳化深度的随机模型

再生混凝土碳化深度的随机模型可以表示为

$$x_c(t) = K \sqrt{t} \quad (3)$$

$$K = K_{mc} K_{CO_2} K_{kl} K_{ks} T^{0.25} R^{1.5} (1-R) \cdot$$

$$\left( \frac{230}{f_{cu}^{RC}} + 2.5 \right) \quad (4)$$

式中: $K$  为再生混凝土碳化速度系数; $K_{mc}$  为再生混凝土碳化深度不定性系数。

再生混凝土碳化深度的平均值  $\mu_x(t)$  与标准差  $\sigma_x(t)$  分别为

$$\mu_x(t) = \mu_K \sqrt{t} \quad (5)$$

$$\sigma_x(t)=\sigma_K\sqrt{t}\tag{6}$$

式中： $\mu_K$  为再生混凝土碳化速度系数均值； $\sigma_K$  为再生混凝土碳化速度系数标准差。

环境温度、湿度的变化基本上是以 1 年为周期，对混凝土碳化的整个历程，环境温、湿度的变异较小，约为 3%~8%。文献[13]中分析了环境变异对碳化深度标准差的影响，从分析结果可以看出，环境因子的变异对碳化深度标准差的影响甚小，在对混凝土结构进行寿命分析时可将环境因子作为确定性变量处理。因而，再生混凝土碳化深度的平均值、标准差分别可表示为

$$\mu_K=\mu_{K_{mc}}K_{CO_2}K_{kl}K_{ks}T^{0.25}R^{1.5}(1-R)\cdot\left(\frac{230}{f_{cu}^{RC}}+2.5\right)\tag{7}$$

$$\sigma_K=\sqrt{\left(\frac{\partial K}{\partial K_{mc}}\right)_{\mu}^2\sigma_{K_{mc}}^2+\left(\frac{\partial K}{\partial f_{cu}^{RC}}\right)_{\mu}^2\sigma_{f_{cu}^{RC}}^2}\tag{8}$$

式中： $\mu_{K_{mc}}$ 、 $\sigma_{K_{mc}}$  分别为再生混凝土碳化深度不定性系数的平均值和标准差； $\sigma_{f_{cu}^{RC}}^2$  为再生混凝土抗压强度标准差； $\left(\frac{\partial K}{\partial K_{mc}}\right)_{\mu}$ 、 $\left(\frac{\partial K}{\partial f_{cu}^{RC}}\right)_{\mu}$  分别为再生混凝土碳化速度系数对再生混凝土碳化深度不定性系数、再生混凝土抗压强度的偏导数在平均值处的均值。

2.1.2 耐久性极限状态

《混凝土结构耐久性设计与施工指南》(CCES 01—2004)<sup>[14]</sup>中规定，混凝土结构及其构件的耐久性应根据不同的设计使用年限、相应的极限状态、不同的环境类别和作用等级进行设计。《混凝土结构耐久性评定标准》(送审稿)中将大气环境下钢筋锈蚀引起的耐久性损伤分为钢筋开始锈蚀、保护层胀裂、性能严重退化 3 个阶段，并根据这 3 个阶段对结构构件正常使用的影响确定相应耐久性失效的标准：

(1)对于在目标使用年限内不允许钢筋锈蚀或严格不允许保护层胀裂的构件(如预应力构件中预应力筋)，可将钢筋开始锈蚀时间  $t_i$  作为耐久性失效的时间。

(2)对于在目标使用年限内一般不允许出现锈胀裂缝的构件，可将保护层胀裂时间  $t_{cr}$  作为耐久性失效的时间。

(3)对于在目标使用年限内允许出现锈胀裂缝或局部破损的构件，可将性能严重退化时间  $t_d$  作为耐久性失效的时间。

本文中笔者以再生混凝土碳化深度达到保护层厚度，钢筋开始锈蚀作为结构耐久性的失效标准。

再生混凝土结构耐久性的极限状态方程为

$$Z(T)=c-x_c(t)=0\tag{9}$$

式中： $c$  为混凝土保护层厚度。

钢筋发生锈蚀的耐久性失效概率  $P_f$  为

$$P_f(t)=P\{c-x_c(t)<0\}\tag{10}$$

钢筋不发生锈蚀的耐久性可靠度指标  $\beta_c$  为

$$\beta_c(t)=-\Phi^{-1}(P_f)\tag{11}$$

2.1.3 目标可靠度

由式(10)可知，钢筋开始锈蚀的概率是结构服役时间的函数，为了预测结构的碳化寿命，必须给出钢筋发生锈蚀的允许概率及其对应的目标可靠度指标。根据《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068—2001)<sup>[15]</sup>的要求，结构构件正常使用极限状态的目标可靠度指标  $\beta_c^*$ ，可根据其可逆程度确定，宜取  $\beta_c^*=0\sim1.5$ 。目标可靠度指标的设定，不仅要考虑建筑物的技术状况，还需要考虑建筑物的重要性(社会、经济影响等)，这是一个极为复杂的系统问题。Eurocode2 将钢筋不发生锈蚀的目标可靠度指标定为 1.3(耐久性失效概率  $P_f\approx10\%$ )。文献[16]中将混凝土构件分为预应力混凝土构件和非预应力构件，并根据混凝土中的钢筋开始锈蚀对结构使用功能的影响程度，给出了碳化的目标可靠度指标(表 1)。综上所述，本文中不考虑碳化残量，规定了再生混凝土碳化至钢筋表面时，钢筋开始锈蚀的耐久性极限状态的失效概率  $P_f$  和目标可靠度指标  $\beta_c^*$ ，如表 1 所示。

表 1 允许耐久性失效概率  $P_f$  和目标可靠度指标  $\beta_c^*$   
Tab.1 Allowable Probabilities  $P_f$  of Durability Failure and Target Reliability Indexes  $\beta_c^*$

构件类型		$P_f/\%$	$\beta_c^*$
预应力钢筋混凝土构件		10	1.25
普通混凝土构件	重要建筑	30	0.50
	一般建筑	50	0.00
再生混凝土构件	重要建筑	10	1.25
	一般建筑	30	0.50

2.2 耐久性分项系数法

第 2.1 节中基于可靠度的耐久性设计方法在工程应用时多有不便，结构工程师习惯于简单实用的设计表达式。笔者在 Sarja 等提出的分项系数法(Lifetime Safety Factor)的基础上，进行了大气环境下再生混凝土结构的耐久性设计研究。

与现行《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)中承载力设计相类似，笔者使用的寿命设计公式为

$$t_d/\gamma_t \geq t_g \quad (12)$$

式中:  $t_d$  为设计使用寿命;  $\gamma_t$  为使用寿命分项系数;  $t_g$  为目标使用年限。

耐久性损伤函数定义为

$$R_0 - R(t) = D(t) \quad (13)$$

式中:  $R_0$  为初始时刻的结构抗力;  $R(t)$  为  $t$  时刻的结构抗力;  $D(t)$  为  $t$  时刻的结构耐久性损伤。

假定耐久性损伤函数的平均值可以表示为

$$\mu[D(t)] = at^n \quad (14)$$

式中:  $\mu[D(t)]$  为耐久性损伤平均值;  $a$  为常数;  $n$  为指数。

对于碳化耐久性而言,式(14)中  $n=0.5$ 。耐久性损伤函数随时间的变化趋势如图1所示。从图1中也可理解耐久性分项系数的涵义、使用寿命的平均值与目标使用寿命之间的关系。

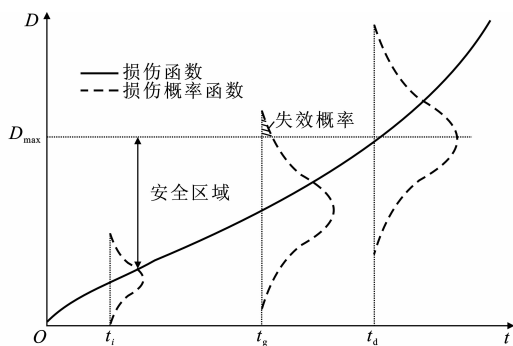


图1 耐久性损伤函数随时间的变化

Fig. 1 Variation of Durability Damage Function with Time

假定耐久性损伤  $D$  服从正态分布,则  $t_g$  时耐久性可靠度指标为

$$\beta_c = \frac{D_{\max} - D_g}{\nu_D D_g} = \frac{1}{\nu_D} \left( \frac{D_{\max}}{D_g} - 1 \right) \quad (15)$$

$$\frac{D_{\max}}{D_g} = \frac{(\gamma_t t_g)^n}{t_g^n} = \gamma_t^n \quad (16)$$

$$\gamma_t = (\beta_c \nu_D + 1)^{\frac{1}{n}} \quad (17)$$

式中:  $D_{\max}$  为耐久性最大允许损伤;  $D_g$  为在  $t_g$  时的耐久性损伤平均值;  $\nu_D$  为耐久性损伤的变异系数。

由式(17)可知,耐久性分项系数由  $t_g$  时耐久性可靠度指标  $\beta_c$  ( $t_g$  时允许的最大耐久性失效概率)、耐久性损伤的变异系数  $\nu_D$ 、指数  $n$  决定,而不是直接由目标使用年限  $t_g$  决定。

对于大气环境条件下的再生混凝土碳化耐久性,再生混凝土碳化深度  $x_c(t)$  即为耐久性损伤函数  $D(t)$ ,则式(17)变为

$$\gamma_t = (\beta_c \nu_{x_c} + 1)^2 \quad (18)$$

式中:  $\nu_{x_c}$  为再生混凝土碳化深度的变异系数。

由式(18)求得  $\gamma_t$  后,根据  $t_d = \gamma_t t_g$ ,将  $t_d$  代入式(3)、(4)中,即可求得再生混凝土碳化深度  $x_c$ 。

### 3 算例分析

以上海地区(环境相对湿度为76%,温度为16.6℃,CO<sub>2</sub>体积浓度为0.03%)一般建筑的再生混凝土构件耐久性分析为例,探讨再生混凝土强度等级、保护层厚度、受力状态、钢筋位置等因素对再生混凝土构件耐久性可靠度指标的影响。

图2给出了再生混凝土强度等级对受拉状态下保护层厚度为25 mm的再生混凝土构件耐久性可靠度的影响。当再生混凝土强度等级从C20增长到C30时,耐久性可靠度指标  $\beta_c$  下降到0.5所需要的时间从28年增加到47年。这说明再生混凝土强度是影响构件耐久性可靠度的重要因素。再生混凝土强度越高,碳化速度越慢,钢筋也就越不容易发生锈蚀。

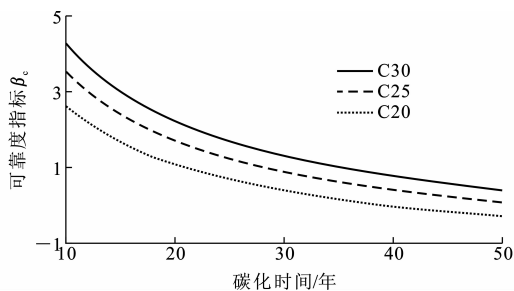


图2 不同再生混凝土抗压强度等级的  $\beta_c$  曲线

Fig. 2  $\beta_c$  Curves with Different Compressive Strength Grades of Recycled Concrete

图3给出了钢筋的再生混凝土保护层厚度对受拉状态下强度等级为C25的再生混凝土构件耐久性可靠度的影响。当保护层厚度从20 mm增加到30 mm时,耐久性可靠度指标  $\beta_c$  下降到0.5所需要的时间从24年增加到54年。这说明保护层厚度是影响构件耐久性可靠度的重要因素,增大保护层厚度可以显著地提高构件的耐久性寿命。

图4给出了不同受力状态对强度等级为C25、保护层厚度为25 mm的再生混凝土构件耐久性可靠度的影响。由图4可以看出,受拉状态下再生混凝土构件耐久性可靠度明显小于受压状态下的可靠度。受拉状态下再生混凝土构件耐久性可靠度指标  $\beta_c$  下降到0.5所需要的时间为38年,而受压状态下再生混凝土构件耐久性可靠度指标  $\beta_c$  在50年后仍为2.0。

图5给出了不同钢筋位置对受拉状态下强度等

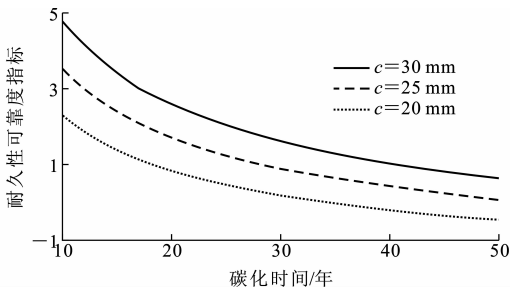


图 3 不同再生混凝土保护层厚度的  $\beta_c$  曲线  
Fig. 3  $\beta_c$  Curves with Different Thickness of Recycled Concrete Covers

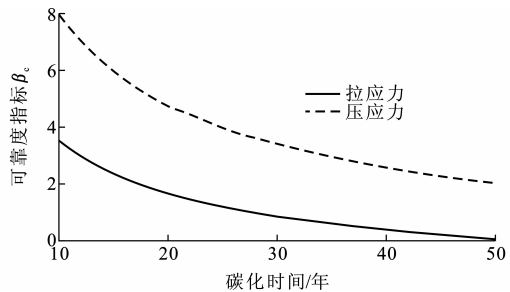


图 4 不同受力状态下的  $\beta_c$  曲线  
Fig. 4  $\beta_c$  Curves with Different Stressed States

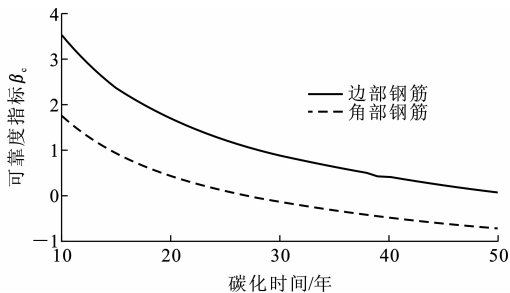


图 5 不同钢筋位置的  $\beta_c$  曲线  
Fig. 5  $\beta_c$  Curves with Different Locations of Reinforcement

级为 C25、保护层厚度为 25 mm 的再生混凝土构件耐久性可靠度的影响。由图 5 可以看出,角部钢筋的耐久性可靠度明显小于边部钢筋的可靠度,角部钢筋的耐久性可靠度指标  $\beta_c$  下降到 0.5 所需要的时间为 19 年,而边部钢筋的耐久性可靠度指标  $\beta_c$  下降到 0.5 所需要的时间为 38 年。

4 讨论与分析

由上述可知,受力状态、钢筋位置对再生混凝土构件耐久性可靠度指标有重要影响。在进行耐久性设计时必须考虑到,不同受力状态下构件中钢筋所需的再生混凝土保护层厚度是不同的。为此,在确定钢筋的再生混凝土最小保护层厚度时,除了需考虑再生混凝土构件中钢筋开始锈蚀对结构使用功

能的影响程度,还应考虑其不同的受力状态(受拉、受压)<sup>[17-19]</sup>。基于此理由,根据表 1 给出的钢筋开始锈蚀目标可靠度指标,采用耐久性极限状态法或分项系数法分析计算上海地区设计使用年限为 50 年的再生混凝土保护层最小厚度,计算结果见表 2。采用分项系数法时,求得  $\nu_{x_c} \approx 0.37$ ,从而得到一般、重要建筑的构件使用寿命分项系数  $\gamma_t$  分别为 1.40、2.14。表 2 还给出了按照《混凝土结构耐久性评定标准》(送审稿)中给出的碳化模型计算得到的普通混凝土保护层最小厚度。

表 2 上海地区混凝土保护层最小厚度计算值

Tab. 2 Calculated Results for Minimal Recycled Concrete

Cover of Reinforcement in Shanghai Area mm

构件类型	建筑类别	再生混凝土强度等级	再生混凝土保护层厚度	普通混凝土保护层厚度
受压构件	一般建筑	C20	20	22
		C25	17	16
		C30	15	12
		C35	14	9
		C40	13	7
	重要建筑	C20	25	28
		C25	21	20
		C30	19	15
		C35	17	12
		C40	16	9
受拉(弯)构件	一般建筑	C20	34	24
		C25	29	17
		C30	26	13
		C35	24	10
		C40	22	8
	重要建筑	C20	42	31
		C25	36	22
		C30	32	17
		C35	29	13
		C40	27	10

从表 2 中可见,再生混凝土保护层最小厚度的计算值,是将再生混凝土保护层当作常量,没有考虑到实际施工的偏差。如果考虑施工偏差,并假定 1 根再生混凝土梁的保护层厚度为  $x$ ,处于碳化锈蚀的一般环境中,取 7 mm 的施工负偏差进行验收,实测厚度达到  $x-7$  mm 就进入验收合格范围。假设实际厚度在 90%保证率的测点上达到  $x-7$  mm,实测保护层厚度的均值为  $x$ (根据验收规范为合格),这时可以反推保护层厚度的方差为  $7/1.28=5.5$ (90%保证率对应的可靠度指标为 1.28)。假定再生混凝土保护层服从正态分布,采用耐久性极限状

态法求解再生混凝土保护层最小厚度的均值  $x$ , 然后取 90% 保证率, 得到上海地区设计使用年限为 50 年的再生混凝土保护层最小厚度建议值, 见表 3。

表 3 上海地区混凝土保护层最小厚度建议值

Tab.3 Suggested Values for Minimal Thick Recycled Concrete Cover of Reinforcement in Shanghai Area mm

构件类型	建筑类别	再生混凝土强度等级	再生混凝土保护层厚度	普通混凝土保护层厚度
受压构件	一般建筑	C20	28	30
		C25	25	24
		C30	24	20
		C35	23	18
		C40	22	16
	重要建筑	C20	34	37
		C25	31	30
		C30	29	25
		C35	28	22
		C40	27	20
受拉(弯)构件	一般建筑	C20	41	32
		C25	37	25
		C30	34	21
		C35	32	19
		C40	30	17
	重要建筑	C20	50	40
		C25	45	32
		C30	41	27
		C35	39	23
		C40	37	21

由表 3 可知:对于受压构件而言,在强度等级较低时(如 C20),普通混凝土保护层最小厚度大于再生混凝土保护层最小厚度;在强度等级大于 C20 时,普通混凝土保护层最小厚度小于再生混凝土保护层最小厚度,且随着强度等级的增大,两者差值也增大。对于受拉构件,普通混凝土保护层最小厚度小于再生混凝土保护层最小厚度,且随着强度等级的增大,两者差值也增大。

5 结 语

- (1)通过分析现有模型并结合试验结果,建立了再生混凝土碳化深度计算模型。
- (2)提出并完成了基于极限状态法和分项系数法的再生混凝土结构耐久性的分析与对比。
- (3)增大再生混凝土强度等级、保护层厚度,可显著提高再生混凝土构件的耐久性寿命。
- (4)受力状态、钢筋位置对再生混凝土构件耐久

性可靠度指标有重要影响,在进行再生混凝土构件耐久性设计时,对此必须予以足够重视。

(5)建议了上海地区不同受力状态下再生混凝土构件中钢筋的保护层最小厚度取值。

参考文献:  
References:

[ 1 ] DHIR R K, LIMBACHIYA M C. Suitability of Recycled Aggregate for Use in BS 5328 Designated Mixes[C]//ICE. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. New York:ICE,1999:257-274.

[ 2 ] LIMBACHIYA M C, LEELAWAT T, DHIR R K. Use of Recycled Concrete Aggregate in High-strength Concrete [J]. Materials and Structures, 2000,33:574-580.

[ 3 ] FUNG W K. Durability of Concrete Using Recycled Aggregates [C]//SCCT. SCCT Annual Concrete Seminar. Hong Kong:SCCT,2005:101-129.

[ 4 ] 陈云钢. 界面改性剂对再生混凝土性能改善效果的初步研究[D]. 上海: 同济大学,2006.

CHEN Yun-gang. Preliminary Study on Performance-improving Effect of the Interface-zone in Recycled Concrete with the Interface-zone Modifying Agent [D]. Shanghai:Tongji University,2006.

[ 5 ] XIAO Jian-zhuang, LEI Bin. On the Carbonation Behavior of Recycled Aggregate Concrete[C]//Tongji University. Proceedings of the International Symposium on Innovation & Sustainability of Structures in Civil Engineering. Shanghai:Tongji University Press, 2007:897-904.

[ 6 ] OTSUKI N, MIYAZATO S, YODSUDJAI W. Influence of Recycled Aggregate on Interfacial Transition Zone Strength Chloride Penetration and Carbonation [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2003, 15(5):443-451.

[ 7 ] 崔正龙, 杨力辉, 大芳贺义喜, 等. 再生混凝土耐久性的试验研究(Ⅱ. 再生混凝土的中性化试验)[J]. 科学技术与工程, 2006, 6(21):3516-3519.

CUI Zheng-long, YANG Li-hui, OHAGA Y, et al. Durability Test Investigation on the Recycled Aggregate Concrete (Part 2 Neutralization Test on Recycled Aggregate Concrete)[J]. Science Technology and Engineering, 2006, 6(21):3516-3519.

[ 8 ] KATZ A. Properties of Concrete Made with Recycled Aggregate from Partially Hydrated Old Concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33 (5): 703-711.

[ 9 ] TAMURA H, NISHIO A, OHASHI J, et al. High

- Quality Recycled Aggregate Concrete (HiRCA) Processed by Decompression and Rapid Release [C]//MALHOTRA V M. Fifth CANMET/ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology. Singapore: ASI, 2001: 491-502.
- [10] 牛荻涛. 混凝土结构耐久性与寿命预测[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- NIU Di-tao. Durability and Life Forecast of Reinforced Concrete Structure [M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [11] 张 誉, 蒋利学. 基于碳化机理的混凝土碳化深度实用数学模型[J]. 工业建筑, 1998, 28(1): 16-19.
- ZHANG Yu, JIANG Li-xue. A Practical Mathematical Model of Concrete Carbonation Depth Based on the Mechanism[J]. Industrial Construction, 1998, 28(1): 16-19.
- [12] GB 50010—2002, 混凝土结构设计规范[S].
- GB 50010—2002, Code for Design of Concrete Structures[S].
- [13] 牛荻涛, 董振平, 浦聿修. 预测混凝土碳化深度的随机模型[J]. 工业建筑, 1999, 29(9): 41-45.
- NIU Di-tao, DONG Zhen-ping, PU Yu-xiu. Random Model of Predicting the Carbonated Concrete Depth [J]. Industrial Construction, 1999, 29(9): 41-45.
- [14] CCES 01—2004, 混凝土结构耐久性设计与施工指南[S].
- CCES 01—2004, Guidelines for the Durability Design and Construction of Concrete Structures[S].
- [15] GB 50068—2001, 建筑结构可靠度设计统一标准[S].
- GB 50068—2001, Unified Standard for Reliability Design of Building Structures[S].
- [16] SARJA A, VESIKARI E. Durability Design of Concrete Structures[M]. London: E & FN Spon, 1996: 165.
- [17] 金伟良, 朱平华. 混凝土结构耐久性的修复性等级划分[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(1): 64-70.
- JIN Wei-liang, ZHU Ping-hua. Restorability Class Partition for Durability of Concrete Structure [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(1): 64-70.
- [18] 贺拴海, 吕颖钊. 考虑材料耐久性的在役混凝土结构可靠度研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(1): 71-75.
- HE Shuan-hai, LU Ying-zhao. Reliability Research of Existing Reinforced Concrete Structures [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(1): 71-75.
- [19] 李建波, 林 皋, 陈健云, 等. 混凝土损伤演化的随机力学参数细观数值影响分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2007, 24(3): 7-12.
- LI Jian-bo, LIN Gao, CHEN Jian-yun, et al. Mesoscopic Numerical Influence Analysis of Random Mechanical Parameter of Concrete Damage Evolution [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2007, 24(3): 7-12.
- ~~~~~
- (上接第 25 页)
- 济大学出版社, 1992.
- SIMIUI E, SCANLAN R. Effect of Wind on Structure; Introduction of Wind Engineering[M]. Translated by LIU Shang-pei, XIANG Hai-fan, XIE Ji-ming. Shang-hai: Tongji University Press, 1992.
- [4] ZHOU Y, KIJIEWSKI T, KAREEEM A. Along-wind Load Effects on Tall Buildings; Comparative Study of Major International Codes and Standards[J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(6): 788-796.
- [5] 张琳琳, 李 杰. 脉动风速互随机 Fourier 谱函数[J]. 建筑科学与工程学报, 2006, 23(2): 57-61.
- ZHANG Lin-lin, LI Jie. Cross Stochastic Fourier Spectrum Function of Turbulence Wind Velocity[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(2): 57-61.
- [6] GB 50009—2001, 建筑结构荷载规范[S].
- GB 50009—2001, Load Code for the Design of Building Structures[S].
- [7] AS/NZ 1170. 2: 2002, Structural Design Actions Part 2: Wind Actions[S].
- [8] AS/NZS 1170. 2: 2002, Structural Design Actions Part 2: Wind Actions—Commentary[S].
- [9] ASNI/ASCE 7-02, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures[S].