

高性能混凝土抗硫酸盐侵蚀耐久寿命预测初探^{*}

杜应吉^{1,2},李元婷²

(1 河海大学 土木工程学院,江苏 南京 210098;2 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院,陕西 杨凌 712100)

[摘 要] 根据南京地铁工程高性能混凝土在硫酸盐侵蚀环境下的试验研究结果,初步建立了基于混凝土衰变规律的抗硫酸盐侵蚀耐久寿命模型,并对该工程进行了寿命预测。

[关键词] 高性能混凝土;硫酸盐侵蚀;耐久寿命;预测模型

[中图分类号] TU528.31 [文献标识码] A [文章编号] 1671-9387(2004)12-0100-03

传统上认为,混凝土材料的耐久寿命几乎是无限的,可不需维护而能长期使用,以致于多年来主要是按强度设计混凝土结构,而很少考虑耐久性;实际上混凝土和其他材料类似,也有其生命周期。据统计^[1],在正常使用条件下,混凝土一般仅有 5070 年的耐久寿命(高性能混凝土可达 100 年以上),若混凝土处于恶劣环境下,且不采取防护措施,则其耐久寿命更低。影响混凝土耐久寿命的主要因素有渗漏、碳化、冻融、氯离子渗透、硫酸盐侵蚀等。硫酸盐侵蚀主要包括钙矾石型和石膏型两种^[2],前者是外界侵蚀介质中的 SO_4^{2-} 进入混凝土孔隙内部,与水泥石中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应生成刺猬状的钙矾石 ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$),当其体积膨胀产生的内应力超过混凝土抗拉强度或极限拉伸率 (0.01%~0.02%) 时,混凝土表面出现少数较粗大的裂缝^[3];石膏型破坏是指侵蚀溶液中 SO_4^{2-} 浓度相当高时,水泥石的毛细孔为饱和石灰溶液所填充,不仅有钙矾石生成,而且在水泥石内部还会有二水石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 析出,其破坏特点是混凝土形成龟裂网状裂缝。混凝土受硫酸盐侵蚀的特征是表面发白,损害通常发生在棱角处,沿着裂缝展开并剥落,成为易碎松散的堆积物,从而导致混凝土耐久寿命的降低^[4]。目前,对于混凝土抗硫酸盐侵蚀性能虽

然作了一些试验研究,但对其耐久寿命的预测尚未有成熟模型^[5]。本研究结合南京地铁工程高性能混凝土 (HPC) 抗硫酸盐侵蚀性能的试验,对硫酸盐侵蚀环境下混凝土耐久寿命进行了预测,建立了混凝土耐久寿命预测模型,以期对混凝土耐久性的研究及其结构设计提供参考。

1 材料与方法

1.1 材 料

本试验采用天宝 32.5 普硅水泥,密度 3.1 g/cm³,CaO 含量 533.6 g/kg;采用宏田江砂,视密度 2.68 g/cm³,细度模数 2.64;小野田泉水碎石,视密度 2.70 g/cm³,根据最小空隙率原理,经试验确定最佳混合比应为 10~20 mm 碎石 20~40 mm 碎石 = 450 g/kg 550 g/kg;粉煤灰用南热粉煤灰开发公司 I 级灰,其 SiO₂ 含量为 521.0 g/kg;瑞迪公司生产的比表面积为 410 m²/kg 的磨细矿渣;外加剂使用 HLC 型抗裂防渗剂。

1.2 方 法

1.2.1 成型与养护 按照试验设计,使用上述材料成型 W/C = 0.38,0.48,0.58 的混凝土试件,其设计配合比见表 1。

表 1 混凝土基准配合比
Table 1 The basic mix proportion of concrete

水胶比 W/C ratio	水泥/(kg·m ⁻³) Cement	砂/(kg·m ⁻³) Sand	碎石/(kg·m ⁻³) Crushed aggregates	粉煤灰/(kg·m ⁻³) Fly ash	磨细矿渣/ (kg·m ⁻³) Slag powder	水/(kg·m ⁻³) Water
0.38	155	730	1 084	117	117	161
0.48	121	613	1 288	91	91	162
0.58	110	610	1 316	81	81	177

[收稿日期] 2004-06-05
[基金项目] 国家 863 高技术研究发展计划项目(2002AA2Z4131)
[作者简介] 杜应吉(1963-),男,陕西咸阳人,副教授,在职博士,主要从事混凝土耐久性研究。

试件成型后 24 h 拆模,移入标准养护室((20 ± 3) ,相对湿度 90 %)养护 28 d。

1.2.2 硫酸盐侵蚀试验 配制质量浓度分别为 0, 3,30,100 g/L 的 Na₂SO₄ 溶液,将混凝土试件放入其中,保持(20 ±3) 的溶液温度进行长期浸泡。达 90,120 和 360 d 龄期后,进行混凝土抗折强度试验。

2 结果与分析

2.1 基本假定

1) 硫酸盐侵蚀情况下,混凝土耐久性劣化是其自身结构损伤引起的,应随原始结构量作自然率衰减,近似符合牛顿物质冷却定律^[6]。即假定其劣化速率为 dR_t/dt,其与抗折强度差成正比,即:

$$\frac{dR_t}{dt} = - \lambda(R_t - R_0) \tag{1}$$

(1) 式积分后得

$$R_t = aR_0e^{-\lambda t}$$

式中,R₀ 为初始抗折强度;R_t 为龄期 t d 的抗折强度;λ 为衰减系数;a 为待定系数。

2) 硫酸盐侵蚀 t d 后,当试件抗折强度低于初始抗折强度的 80 %时,可认为该混凝土抗硫酸盐侵蚀的耐久寿命已经丧失^[7]。

3) 最能反映硫酸盐侵蚀程度的耐久性参数是试件的抗折强度 R_t,原材料、掺合料、水胶比等相同混凝土的抗折强度劣化规律相似^[8]。

硫酸盐侵蚀试验的主要抗折强度试验结果见表 2。

表 2 不同质量浓度 Na₂SO₄ 对不同水胶比混凝土试件抗折强度(120 d)的影响

Table 2 Effect of Na₂SO₄ with different concentration on the flexural strengths of concrete with different W/ C ratio

编号 Number	Na ₂ SO ₄ 质量浓度/(g L ⁻¹) Na ₂ SO ₄ concentration											
	0			3			30			100		
	0.38	0.48	0.58	0.38	0.48	0.58	0.38	0.48	0.58	0.38	0.48	0.58
A1	11.9	8.8	7.7	11.5	11.0	7.8	11.8	10.3	5.0	11.2	5.2	3.9
A2	10.9	6.9	5.9	11.7	9.0	8.1	-	7.7	8.8	15.2	6.0	-
A3	11.0	7.4	6.2	11.2	7.0	5.3	12.9	-	8.2	11.2	8.7	6.6
A4	11.8	10.0	4.2	13.5	10.8	8.2	14.5	7.7	8.2	12.1	8.9	7.7
A5	12.4	8.3	6.0	12.5	5.2	7.3	15.1	8.4	7.8	10.1	8.4	6.7
A6	15.4	8.3	6.8	14.0	9.6	-	11.2	8.4	7.3	10.4	8.7	7.5
A7	10.8	7.5	5.1	11.8	12.1	6.8	14.7	6.2	-	9.4	9.0	5.3
A8	11.0	9.2	5.6	14.7	10.2	7.4	13.9	6.6	6.6	12.9	8.1	6.8

注:“-”表示试件破损。

Note:“-” mean material injured.

2.2 抗折强度 R 与龄期 t 的关系

据研究^[9], W/ C = 0.38 时的混凝土是较理想的长寿混凝土。以 W/ C = 0.38 的混凝土试验结果为基准,设其 120 d 抗折强度为 R₀,其衰减系数 λ = 0.002,则抗蚀系数 k = R_t/ R₀ 与龄期 t 的关系为:

$$R_t = aR_0e^{-0.002t} \tag{2}$$

设 a = k_s k_n k_c,其中 k_s, k_n, k_c 分别为不同水胶比 s (W/ C)、不同硫酸根质量浓度 n 以及不同掺和料掺量 c 等单因素下试件的抗折强度修正系数,则抗折强度与龄期 t 的关系为:

$$R_t = k_s k_n k_c R_0 e^{-0.002t} \tag{3}$$

1) 水胶比修正系数 k_s 的确定

根据试验结果,对水胶比 s = 0.38,0.48,0.58 时,不同龄期的抗折强度分别进行以 s = 0.38 的混凝土为标准的归一化处理,此时硫酸盐质量浓度 n = 0.0 g/L,粉煤灰掺量为 300 g/kg。经回归计算得

不同水胶比时修正系数 k_s 与水胶比的关系为

$$k_s = 0.303 s^{-1.246} (R^2 = 0.903) \tag{4}$$

2) 硫酸根质量浓度(SO₄²⁻) 修正系数 k_n 的确定 分别对硫酸根离子质量浓度 n = 0,3,30,100 g/L,水胶比 s = 0.38,粉煤灰掺量 300 g/kg 的抗折强度进行计算,可得到硫酸盐质量浓度(SO₄²⁻) 的修正系数为

$$k_n = 1 - 0.0002 n^2 + 0.0123 n (R^2 = 0.892) \tag{5}$$

3) 掺合料修正系数 k_c 的确定

根据试验结果,对硫酸根离子质量浓度 n = 0.0 g/L,水胶比 s = 0.38 时,不同掺合料掺量的抗折强度进行计算,可得到掺合料修正系数 k_c 为:

$$k_c = 1.079 e^{-0.0178c} (R^2 = 0.834) \tag{6}$$

4) t 龄期时抗折强度预测模型的建立

根据(2) ~ (6) 式,可得到以抗折强度为评价指

标,综合硫酸根质量浓度 n 、水胶比 s 及掺合料掺量 c 等因素的 t 龄期抗折强度指数衰减规律预测模型,即

$$R_t = k_s k_n k_c R_0 e^{-0.002t} = 0.303 s^{-1.246} (1 - 0.0002 n^2 - 0.0123 n) R_0 e^{-0.002t - 0.0178c}$$

即可推得龄期 t 的表达式为:

$$t = -500 \ln \frac{3.06 R_0 e^{0.0178c}}{(1 - 0.0002 n^2 + 0.0123 n) s^{-1.246}} \quad (7)$$

式中, t 为混凝土龄期 ($t \geq 10$ 年); n 为硫酸根质量浓度 (g/L); s 为水胶比; c 为掺和料的掺量 (g/kg); k 为抗蚀系数 ($k = R_t / R_0$, 一般取 0.80)。

2.3 高性能混凝土抗硫酸盐侵蚀的耐久寿命预测

对于南京地铁工程,其地下水位较高,对混凝土无腐蚀性,但对钢结构有轻微腐蚀^[10]。针对所用的混凝土配比,取水胶比 $W/C = 0.38$,硫酸根质量浓度 $n = 2.0$ g/L,当抗蚀系数 $k = R_t / R_0 = 0.80$ 时,认为混凝土工程已失去耐久寿命。将以上条件代入 (7) 式计算得到在该工程现场环境下使用 C30 混

土的耐久寿命约为 134 年。

3 讨 论

在混凝土硬化早期,试件的抗压强度随 Na_2SO_4 质量浓度的增加而有微小升高,这是因为 Na_2SO_4 在质量浓度较小时,试件内部的膨胀应力尚未达到抗压极限,从而抵抗了收缩裂缝的形成,硫酸盐起到了类似“膨胀剂”的作用^[11]。但当 Na_2SO_4 质量浓度达到 30 g/L 时,抗压强度有所下降。而抗折强度一般随 Na_2SO_4 质量浓度和龄期的增加而降低,但速率较缓,这是因为抗折强度实质上代表了抗拉强度, Na_2SO_4 质量浓度和龄期的增加导致了试件内拉应力的增加,故其抗折强度降低^[12]。

本文建立的基于混凝土抗折强度,考虑硫酸根质量浓度 n 、水胶比 s 等因素的耐久年限混凝土抗折强度指数衰减规律预测模型,是在所用原材料和 $W/C = 0.38 \sim 0.58$ 条件下建立的,要建立适应性更强的预测模型,还需做大量的试验研究工作。

[参考文献]

- [1] 刘崇熙. 坝工混凝土耐久寿命的衰变规律[J]. 长江科学院院报, 2000, 35(4): 20 - 24.
- [2] 张 丽. 混凝土硫酸盐侵蚀的机理及影响因素[J]. 东北公路, 1998, (4): 41 - 44.
- [3] 王新友, 李宗津. 混凝土使用寿命预测的研究进展[J]. 建筑材料学报, 1999, 2(3): 249 - 256.
- [4] 屈文俊. 侵蚀性环境下混凝土结构耐久寿命预测方法探讨[J]. 工业建筑, 1999, (4): 38 - 41.
- [5] 冯乃谦. 高性能混凝土结构[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004. 281 - 285.
- [6] 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. 164 - 168.
- [7] 贺鸿珠. 粉煤灰对地铁杂散电流的抑制作用[J]. 混凝土与水泥制品, 2001, (1): 32 - 36.
- [8] Eivind Hognestad. Design for durability[J]. Concrete International, 1997, (2): 34 - 36.
- [9] Clifton J R. Predicting the service life of concrete[J]. ACI Materials Journal, 1998, 90(6): 611 - 617.
- [10] Somerville G. The design life of concrete[J]. The Structural Engineer, 1999, (5): 60 - 71.
- [11] 亢景富. 混凝土硫酸盐侵蚀研究中的几个问题[J]. 混凝土, 1995, (3): 56 - 58.
- [12] 李志国. 试论盐及溶液对混凝土的破坏[J]. 混凝土, 1995, (2): 28 - 34.

Preliminary study on the prediction of service life of high performance concrete in sulphate erosion resistance

DU Ying-ji^{1,2}, LI Yuan-ting²

(1 College of Civil Engineering, Hehai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

2 College of Water Resource and Architecture Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: According to the testing results of high-performance concrete in sulphate erosion environment at Nanjing underground railway project, a prognosticating model of sulphate-resistance erosion is established, which is based upon the disintegration law of concrete, and the project service life is prognosticated by using this model.

Key words: high performance concrete; sulphate erosion; service life; prediction model