

防腐混凝土在岩土工程施工中的应用

赖都成¹, 张琪清², 苏芝芳³

(1. 福建省第三地质工程公司, 福建 邵武 354000; 2. 江西省勘察设计研究院, 江西 南昌 330012; 3. 福建省九建建筑工程有限公司, 福建 宁德 352100)

摘要:结构防腐主要从混凝土内部阐述其腐蚀性, 并通过掺入外加剂进行有机补偿, 使其应用于各种抗裂防渗混凝土, 尤其适用于与防水有关的地下、水工、海工、地铁、隧道和水电等钢筋混凝土结构工程。

关键词:防腐混凝土; 岩土工程; 地下工程

中图分类号: TU528.33 **文献标识码:** B **文章编号:** 1672-7428(2007)03-0043-04

0 引言

建筑结构防腐与裂缝控制是一个系统工程, 近 10 年来, 我国工民建向长期化、复杂化发展, 商品混凝土普及应用, 混凝土强度等级从 C30 向 C50 发展, 这些因素导致钢筋混凝土结构开裂的机率增多。

大多数土壤中都含有一些硫酸盐, 若硫酸盐浓度低, 则对混凝土不会产生太大的影响; 若硫酸盐浓度高, 则可对建筑物或构筑物的地下部分, 如桥梁、隧道、涵洞和房屋的基础产生显著的破坏作用。这种破坏可能以膨胀形式出现而导致结构位移。硫酸盐膨胀也可使混凝土中的水泥水化产物丧失胶凝性, 呈酥松状或糊状。我国隧道工程中也常遇到硫酸盐浓度高的地质环境。

本工程为福建省某矿业公路改线工程, 长度为 5.488 正线公里, 位于两矿隧道之间, 附近是矿区蓄水区, 蓄水后将形成一个污水水库, 库内为酸性水。设计文件说明: 段内地表水为永坎铜矿水库库内及排出的沟水, 根据与原既有线定测水质分析结果, 水质属 SO_4^{2-} 、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 型水, 对混凝土有强酸性和强溶出型及中等硫酸侵蚀性, 矿区排出的水硫酸根含量达 1200 mg/L, 具有强腐蚀性。在附近流经线路的沟水, 水质属 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Cl}^- - \text{K}^+ + \text{Na}^+$ 型水, 对混凝土具有中等溶出型和弱酸性侵蚀。为此设计要求桥梁墩台基础及地面上 2 m 以下部分的墩身, 涵洞基础及边墙以及 2 号隧道的混凝土均采用防腐混凝土。

根据以上设计说明, 我们在一进场就进行施工

调查, 首先对各作业点的地表水进行随机取样, 及时送实验中心及卫生防疫站进行水质化验分析, 化验结果水质呈酸性, 并将水质报告送至有关部门, 经确认其侵蚀程度为中等侵蚀。

1 硫酸盐腐蚀机理

硫酸盐腐蚀是指环境中的 SO_4^{2-} 与硬化水泥浆的某些组分(水化硫铝酸钙、氢氧化钙)起化学反应, 生成二水石膏或钙矾石, 其相同体积比反应物增加 1 倍多, 在水泥石内部产生很大的膨胀应力, 造成混凝土膨胀开裂以至毁坏。

环境水中的 SO_4^{2-} 含量不同, 能使硬化水泥浆产生不同性质的腐蚀, 当 SO_4^{2-} 浓度较低时, 它使硬化水泥浆产生硫铝酸钙腐蚀, 当 SO_4^{2-} 浓度 > 1000 mg/L 时, 除了硫铝酸钙腐蚀外, 还会产生石膏型的腐蚀。

从腐蚀的实际过程来看, 硫铝酸钙腐蚀是由于生成钙矾石, 最初使硬化水泥浆变成密实, 强度增加。但随着钙矾石生成量的继续增多, 产生局部膨胀压力, 使结构胀裂, 强度下降而破坏, 在遭受硫铝酸钙腐蚀的试体上面可看到较大裂缝, 而石膏的腐蚀是先经历一个强度降低的过程, 继之膨胀、开裂。

混凝土后期膨胀出现裂缝, 主要原因是:

- (1) 水泥中游离 CaO 过高, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 体积膨胀所致;
- (2) 水泥中 MgO 过高, $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 体积膨胀所致;

收稿日期: 2006-10-10

作者简介: 赖都成(1973-), 男(汉族), 福建泉州人, 福建省第三地质工程公司副总经理、一级项目经理、注册一级建造师, 水文地质与工程地质专业, 从事桩基、地基基础、地质灾害和总承包管理工作, 上海市闵行区七莘路 2465 弄 125 支弄 7 号楼(201101), (021)54858530; 张琪清(1972-), 男(汉族), 江西宜春人, 江西省勘察设计研究院综合分院主任工程师, 岩土工程专业, 从事工程勘察与设计工作, 江西省南昌市昌东高校园区紫阳大道 168 号, (0791)8195052, wzzq_97@126.com; 苏芝芳(1964-), 男(汉族), 福建宁德人, 福建省九建建筑工程有限公司工程师, 工业与民用建筑专业, 从事工民建工作, 福建省宁德市蕉城区蕉城北路 23 号, (0593)2822880。

(3)水泥和外加剂碱含量过高,与集料中活性硅等发生碱-集料反应所致;

(4)有害离子 Cl^- 、 Mg^{2+} 等侵入混凝土内部,导致钢筋锈蚀或形成二次钙矾石膨胀破坏所致。

2 防腐混凝土原材料的选择

考虑混凝土防腐主要是材料的耐久性,因为耐久性对结构的维修和更新费用,有重大经济意义。耐久性被定义为材料在给定的环境条件下的使用年限。一般,密实的或不透水的混凝土具有长期的耐久性,而取决于它的配合比、捣实的程度和养护及正常环境的温度和湿度。

在以往工程中采用抗硫酸盐水泥配制防腐混凝土。但由于抗硫酸盐水泥作为特种水泥,目前国内生产厂家生产规模较小,并受工艺、运距、数量、价格较高等因素影响,制约了防腐混凝土商品化的发展。而我们利用普通硅酸盐水泥和 NF-C 耐腐蚀防水剂和优质粉煤灰,配制防腐混凝土并应用到永坎铜矿改线工程上,既解决了混凝土的防腐问题,又降低了混凝土成本,取得了较好的经济和社会效益。

2.1 水泥

国内外有关资料的分析表明,在水泥的各个主要矿物组成中, C_3A 的含量大小对水泥的抗硫酸盐侵蚀能力影响最大,其次取决于 C_3S 含量。

表 1 为水泥中各主要矿物的含量对抗硫酸盐性能的影响。

表 1 水泥中各主要矿物的含量对抗硫酸盐性能的影响表

矿物组成/%				膨胀率/(在 3% Na_2SO_4 溶液中浸泡)			
C_3A	C_3S	C_2S	C_4AF	90 天	180 天	270 天	365 天
5	60	20	15	1.26	胀坏		
4	60	20	16	0.41	2.5	胀坏	
3	60	20	17	0.18	0.58	1.22	1.56
2	60	20	18	0.15	0.68	1.18	1.59
1	60	20	19	0.06	0.15	0.30	0.09
0	60	20	20	0.01	0.02	0.06	0.11

水泥用量增加可提高混凝土密实度,从而提高混凝土的抗硫酸盐性能。G. J. Verbeck 对加利福尼亚州萨拉曼都硫酸盐土壤(含 10% Na_2SO_4) 中的混凝土试件进行长期研究,其结果见图 1。

从图 1 可见,当水泥用量为 225 kg/m^3 和 310 kg/m^3 时,硫酸盐溶液对混凝土的破坏程度随着 C_3A 的增加而增大,但当水泥用量达 390 kg/m^3 时,硫酸盐溶液对混凝土的破坏随着 C_3A 含量的增加而只有稍微增加。ASTM 标准的 5 种水泥中除早强型水泥外, I、II、III 和 V 型水泥(水泥中 C_3A 含量

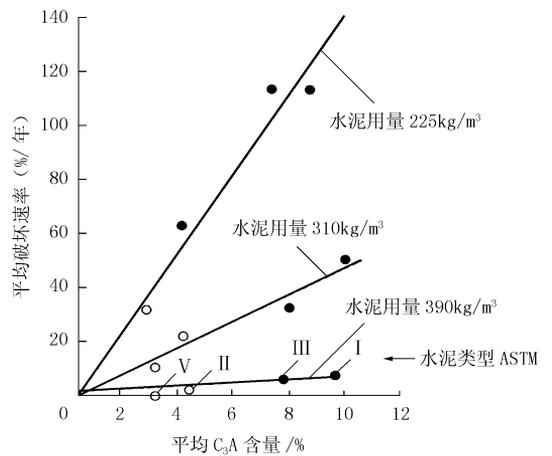


图 1 混凝土中水泥品种(C_3A 含量)对其性能的影响

分别为 10%、4%、8% 和 3%) 混凝土的破坏几乎为零。这说明高水泥用量会显著地增强混凝土的抗渗性,进而提高混凝土的抗侵蚀能力。防腐混凝土使用的水泥除物理性能满足标准要求外,其 C_3A 含量不超过 8%,同时为防止碱集料反应,应尽量采用低碱水泥,我们选用了“科华”牌 P. O32.5 水泥。

2.2 粉煤灰

在本项的混凝土施工过程中,掺入一定量的粉煤灰,这样可改善混凝土的抗腐蚀性能,因为首先用火山灰质混合材将降低水泥中的 C_3A 和 C_3S 的含量,相当于在混凝土中所用的胶结材料是低 C_3A 和低 C_3S 的水泥。其次这些火山灰质混合材的水泥水化过程中产生 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,引起化学反应生成 C-S-H 凝胶,除了消除一部分 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 外,还能提高强度。 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的消除将减轻其膨胀危害,强度的提高则能限制其膨胀。C-S-H 凝胶的产生使结构致密,降低了 SO_4^{2-} 渗透进混凝土的能力。所以我们选用了江西贵溪电厂 II 级粉煤灰。

2.3 砂

为降低混凝土中的 Cl^- 含量,我们选用了级配良好、含泥量等符合标准的中砂。

2.4 卵石

通常,天然砾石呈圆形,具有光滑的表面结构;破碎的岩石表面具有粗糙结构,粗糙度取决于岩石类型及所选择的破碎设备。破碎的骨料可以含有相当数量的扁平 and 长条颗粒,这类颗粒对混凝土许多性质起不良影响。呈高度蜂窝状的浮石轻骨料同样呈多角形和粗糙结构,但陶粒或页岩轻骨料通常呈圆形和光滑结构。为提高混凝土密实度,我们选用 0.5~4.0 cm 连续级配卵石配制防腐混凝土。

2.5 防腐剂

为了抑制混凝土的侵蚀,并对市场上的调查,我们选定了 NF-C 耐腐蚀防水剂,此剂具有一定的引气和减水功能,降低了混凝土的用水量,在混凝土中形成大量的密闭、均匀的微气孔,改善了混凝土的孔结构,提高了混凝土的密实度。

3 防腐混凝土配合比设计

根据设计说明及现场取样的水质分析报告来确定混凝土配合比设计的防腐等级,高水泥用量低渗透性的混凝土具有较高的抗硫酸性能,因此在混凝土施工过程中应尽量提高其抗渗性。除了增加水泥用量外,另外一个重要措施就是降低水灰比,一般情况下水灰比低则混凝土致密,抗渗性也相应地提高。

3.1 按试配强度计算水灰比

$$f_{cu.o} = f_{cu.k} + 1.645\sigma = 28.2 \text{ MPa}$$

$$W/C = 0.46f_{ce}/(f_{cu.o} + 0.46 \times 0.07f_{ce})$$

$$= 0.46 \times 36.7 / (28.2 + 0.46 \times 0.07 \times 36.7)$$

$$= 0.56$$

按《公路混凝土与砌体工程施工规范》(TB 10210-2001/J 118-2001)中表 C.0.2 环境水对混凝土侵蚀类型及侵蚀程度的判断的判定规则(见表 2),永坎铜矿改线工程的地表水水质属中等侵蚀,所以根据表 C.0.3 混凝土受硫酸盐、盐类结晶或溶出型侵蚀的防护措施的规定(见表 3),其最大水灰比应小于 0.50,要求抗渗等级 $\geq P8$ 。

表 2 环境水对混凝土侵蚀类型及侵蚀程度的判定表

序号	侵蚀类型	环境条件特征		判定项目	侵蚀程度		
		地质条件	水质 pH 值		弱侵蚀	中等侵蚀	强侵蚀
1	硫酸盐侵蚀	石膏地层	7.0 ~ 8.0	$SO_4^{2-}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	500 ~ 1000	1001 ~ 2000	> 2000
		含盐地层	7.5 ~ 9.0		1000 ~ 2000	2001 ~ 4000	> 4000
2	镁盐侵蚀	含镁盐渍土、盐湖、盐田、海水	8.0 ~ 10.0	$Mg^{2+}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	1000 ~ 3000	3001 ~ 7500	> 7500
3	盐类结晶侵蚀	干旱地区盐渍土、碱土、滨海平原盐渍土	8.0 ~ 12.0	溶解盐类/ $(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	10 ~ 15	16 ~ 30	> 30
4	硫酸型酸性侵蚀	煤系地层、黑色岩层、有色金属矿田、矿脉	1.5 ~ 6.5	pH 值	6.5 ~ 6.1	6.0 ~ 5.0	≤ 5.0
				$SO_4^{2-}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	≤ 250	251 ~ 1000	> 1000
5	溶出型侵蚀(含碳酸型侵蚀)	富含有机质的淤泥和土壤,低矿化度河水和地下水	5.0 ~ 6.5	pH 值	6.5 ~ 6.1	6.0 ~ 5.0	-
				$HCO_3^{-}/(\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1})$	1.5 ~ 0.7	< 0.7	-

表 3 混凝土受硫酸盐、盐类结晶或溶出型侵蚀的防护措施表

侵蚀程度	宜用的水泥品种及掺合料	最大水灰比	最小水泥用量/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	抗渗等级
弱侵蚀	普通硅酸盐水泥($C_3A < 8\%$),并采取下列措施之一: ①掺 20% 的粒化高炉渣粉 ②掺 20% 的粉煤灰 ③掺 5% 的硅灰	0.55	300	$\geq P6$
	矿渣硅酸盐水泥 粉煤灰硅酸盐水泥 火山灰质硅酸盐水泥			
	普通抗硫酸盐水泥($C_3A < 5\%$)	0.60	300	
	普通硅酸盐水泥($C_3A < 8\%$),并采取下列措施之一: ①掺 20% 的粒化高炉渣粉 ②掺 20% 的粉煤灰 ③掺 5% 的硅灰	0.50	300	$\geq P8$
	矿渣硅酸盐水泥 粉煤灰硅酸盐水泥 火山灰质硅酸盐水泥			
中等侵蚀	普通抗硫酸盐水泥($C_3A < 5\%$)	0.55	300	
	高级抗硫酸盐水泥($C_3A < 2.5\%$)	0.60	300	
强侵蚀	普通抗硫酸盐水泥($C_3A < 5\%$)	0.45	360	$\geq P10$
	高级抗硫酸盐水泥($C_3A < 2.5\%$)	0.50	330	

3.2 计算水泥用量、粉煤灰用量

根据防腐混凝土施工工艺要求确定坍落度为 30 ~ 50 mm。通过混凝土拌合物性能试验选择用水量 171 kg/m^3 。粉煤灰采用外加法,掺入量为水泥用量的 30%。

$$\text{水泥用量 } C_0 = 171 / 0.43 = 398 \text{ kg}$$

$$\text{粉煤灰用量 } F_m = C_0 \times 30\% = 398 \times 30\% = 119 \text{ kg}$$

3.3 计算砂石用量

按假定容量法 2400 kg/m^3 计算,砂率取 38.0%。

$$\text{砂用量 } S_m = 558 \text{ kg}, \text{石用量 } G_0 = 1136 \text{ kg}$$

3.4 计算外加剂用量

按计算的水泥用量 C_0 计算外加剂用量,按 8% 最佳掺量掺入。

3.5 根据实测容重调整混凝土的原材料用量

4 正交试验设计

4.1 选择因素水平

因素水平详见表 4。

表4 混凝土抗压强度试验的因素水平表

水平	因素	
	A	B
	防腐剂掺量/%	粉煤灰掺量/%
1	8	0
2	4	20
3	12	30

4.2 正交试验结果与极差分析

$L_9(3^4)$ 正交试验结果及极差分析详见表5。

表5 $L_9(3^4)$ 正交试验结果及极差分析表

试验号	因素				考核指标	
	A	B	空列	空列	抗压强度/MPa	
	1	2	3	4	R_7	R_{28}
1	1	1	1	1	28.2	43.7
2	1	2	2	2	25.6	39.5
3	1	3	3	3	23.8	36.5
4	2	1	2	3	23.5	36.2
5	2	2	3	1	22.3	34.1
6	2	3	1	2	20.7	31.9
7	3	1	3	2	22.4	34.6
8	3	2	1	3	21.2	32.9
9	3	3	2	1	20.1	31.0
R_7	I	77.6	74.1	70.6	70.1	
	II	66.5	69.1	68.7	69.2	
	III	63.7	64.6	68.5	68.5	
	\check{R}	4.6333	3.1667	0.70	0.5333	
R_{28}	I	119.7	114.5	108.5	108.8	
	II	102.2	106.5	106.7	106.0	
	III	98.5	99.4	105.2	105.6	
	\check{R}	9.5333	5.0333	1.1	1.0667	

由极差大小可知: NF-C 耐腐蚀防水剂对混凝土抗压强度的影响最大, 粉煤灰对混凝土抗压强度的影响次之。计算表明, A 因素和 B 因素三个水平测值的和, 均以第一水平为最大, 即粉煤灰掺量越小, NF-C 耐腐蚀防水剂掺量最佳时, 混凝土抗压强度越大。

4.3 方差分析

$L_9(3^4)$ 正交试验结果及方差分析详见表6、表7。

表6 R_7 方差分析表

方差来源	平方和 S	自由度 f	均方	F 值	临界值		显著性
					$F_{0.05}$	$F_{0.01}$	
防水剂掺量 A	108.09	2	54.045	54.318	6.94	18	☆☆
粉煤灰掺量 B	45.17	2	22.585	22.698	6.94	18	☆☆
误差 e_3	1.29	2	0.645				
误差 e_4	2.69	2	1.345				
误差 e	3.98	4	0.995				
总和	157.24	8					

表7 R_{28} 方差分析表

方差来源	平方和 S	自由度 f	均方	F 值	临界值		显著性
					$F_{0.05}$	$F_{0.01}$	
防水剂掺量 A	256.46	2	128.23	44.447	6.94	18	☆☆
粉煤灰掺量 B	114.14	2	57.07	19.782	6.94	18	☆☆
误差 e_3	5.46	2	2.73				
误差 e_4	6.08	2	3.04				
误差 e	11.54	4	2.885				
总和	382.14	8					

上述试验数据分析表明, NF-C 耐腐蚀防水剂和粉煤灰对混凝土抗压强度的影响均是显著的。且国内外大量试验已经证明粉煤灰的活性一般在后期得到发挥, 它对混凝土的后期强度有较大贡献, 有利于后期强度的发展。所以本次试验没有再取 60 天和 90 天龄期的抗压强度来验证这一点。

5 捣实和养护

正确捣实可提高混凝土的密实度, 避免过振而使浮浆过厚, 确保抹压及时不出现塑性裂缝, 同时认真对施工缝和细部结构进行微处理, 可阻止 SO_4^{2-} 向混凝土内部渗透, 而潮湿养护则是混凝土强度发展的重要因素, 对于掺矿物掺合料特别是掺粉煤灰的混凝土, 更应该加强潮湿养护。

施工过程中由于混凝土保温、保湿养护不到位, 容易产生收缩裂缝。特别是露天构筑物, 尽管当地湿度很大, 但是由于吹风影响, 加速了混凝土水分蒸发速度, 亦即增加干缩速度, 容易引起早期表面裂缝, 这也是夏季比秋季、南方比北方出现结构裂缝较多的原因。不少结构在浇注完了 3~6 个月, 甚至在 1~2 年内出现裂缝, 除荷载问题外, 主要还是环境温度和风速引起的收缩变形所致。有些基础不及时复土, 出入口长期敞开, 局部防水层破坏不及时修补, 这些与施工和建设方对结构维护缺乏认识有关。因此, 在施工和使用过程中, 我们重视已浇结构的保温、保湿维护工作, 除确保其强度达到规定强度等级 100% 外, 尽量减少“热胀冷缩”之影响。

6 应用效果

在施工过程中我们对防腐混凝土的试件进行了抗渗试验, 水压力加至 1.1 kPa 时, 试件均未出现渗水, 其抗渗等级全部能够满足设计要求, 同时其相对应的混凝土试件进行抗压强度试验, 其强度等级也达到了设计要求。该防腐堵漏效果工程完成 2 年后回访, 防腐堵漏效果显著而无任何新的问题产生。

(下转第 57 页)



图 2 双排水泥窑爆破过程

降低爆堆高度,除了在爆破切口范围内的立柱布眼爆破外,还采取了下列措施:在切口范围内与倾倒方向平行的横梁布 2 个炮眼,使爆破时横梁折断;在切口范围外的其它各排立柱,除最后一排柱外,每层布 2 个炮眼装药爆破,以使楼房倒塌充分。爆破实践证明,措施是有效的。

(3)对于只有 2 排立柱的水泥窑,可以通过对后排立柱的网路和爆高控制,从而对水泥窑的后坐进行定量控制。

(4)对双排水泥窑爆破是本次爆破工程的重点

和难点。在爆破切口范围内的前排水泥筒体的预处理一定要充分。因双排水泥窑的高宽比小,设计的爆破切口,必须使爆破后爆破切口闭合时,整个构筑物的重心的平面投影一定要移出水泥窑的平面投影的边缘之外,才能确保水泥窑顺利倾倒。为了防止爆破后水泥窑下坐,爆破切口范围外的立柱折断影响倾倒,最后一排柱可不布眼。爆破后,水泥窑的重力足以使最后一排柱折断。

(5)爆破后产生的粉尘较大。虽然采取了爆破前清扫楼板积尘、部分厂房楼板上设置水池、对包裹布眼立柱的草袋洒水等措施,但因爆破规模较大,部分水泥窑里还储有半筒的半成品(泥粉)等,致使爆破后的粉尘仍然较大。以后的爆破中,为更好地保护环境,应采取更多措施加以控制。

参考文献:

- [1] 黎剑华,赵江倩,等.大型水泥筒仓结构群体的拆除爆破技术[J].工程爆破,2006,(1):35-38.
- [2] 刘殿中.工程爆破手册[M].北京:冶金工业出版社,1993.
- [3] 冯叔瑜,吕毅,等.城市控制爆破[M].北京:中国铁道出版社,1996.

致谢:本次拆除爆破工程的设计在广东 2006 年爆破技术人员培训班学习期间得到了考核专家组史雅语教授的热情指导,设计与施工得到了广东肇庆广地爆破工程公司经理黎学平高级工程师的指导,在此深表谢意!

(上接第 42 页)

水下砼 C10(添加速凝剂)浇注,待初凝 8~10 h 后,固壁作用开始发挥,进行透槽施工,循环使用此方法直至穿透坍塌段。

5.2 成槽、成墙

砾(卵)石松散、易塌层经固壁后,使用常规法成槽施工达到设计要求的深度,然后浇注水下砼并成墙。

6 结语

处理极松散段的砾(卵)石层,采用上述方法可

大大节省人力物力,我们将此法应用于江西省丰城市赣江大堤粮 2 标段、抚州赣抚大堤八宝堤段、廖坊水库大堤等多个工程项目的松散、易塌地层成槽施工实践,效果良好,且实现了槽内骨料的综合利用;完工项目所形成的防渗墙,经汛期洪水的考验,坝基附近的泡泉、涌水现象消失,止水效果良好。

致谢:本文在写作过程中得到了刘留春先生的大力帮助,在此表示衷心的感谢!

(上接第 46 页)

7 结语

通过对混凝土机理的研究和环境的分析,结合试验数据,确定了通过掺入外加剂进行有机补偿和施工合理的控制,对增强混凝土的耐久性、延长混凝土建筑物使用寿命具有很强的现实意义。同时通过

环保角度和避免重复建设角度考虑,防腐蚀混凝土的前景令人乐观,具有较高的经济价值。

参考文献:

- [1] 陈肇元.混凝土结构的耐久性设计方法[J].建筑技术,2003,24(5).
- [2] 牛荻涛.混凝土结构的耐久性与寿命预测[M].北京:科学出版社,2003.