

考虑碳化作用的水工混凝土耐久性研究

车明杰

(中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司,四川 成都 610072)

摘要:水工混凝土在自然界中可能受到碳化侵蚀,碳化后混凝土体积收缩,严重者甚至产生裂缝,混凝土开裂会造成混凝土内部钢筋锈蚀从而进一步加剧裂缝,最终导致水工混凝土结构破坏,极大的影响着水工混凝土的耐久性。笔者通过配制不同配合比水工混凝土试件进行碳化试验,得到不同水灰比和不同减水剂掺量的水工混凝土在 4 d、7 d、14 d、28 d 龄期的碳化深度结果,并对碳化试验结果进行分析,通过分析碳化深度的变化趋势,为考虑碳化作用下合理设计水工混凝土水灰比及减水剂掺量提供研究数据,进一步为碳化作用下水工混凝土寿命预测提供了研究基础。

关键词:碳化作用;水工混凝土;耐久性

中图分类号:TV431;TV331

文献标志码: B

文章编号:1001-2184(2023)06-0108-04

Study on the Durability of Hydraulic Concrete Considering Carbonization

CHE Mingjie

(PowerChina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu Sichuan 610072)

Abstract: Hydraulic concrete may be subjected to carbonation erosion in nature. After carbonation, the volume of concrete shrinks, and in severe cases, cracks may even occur. Concrete cracking can cause corrosion of internal steel bars in the concrete, further exacerbating the cracks, ultimately leading to structural damage to hydraulic concrete, greatly affecting the durability of hydraulic concrete. The author conducted carbonation tests on hydraulic concrete specimens with different mix ratios, and obtained the carbonation depth results of hydraulic concrete with different water cement ratios and water reducing agent dosages at the ages of 4, 7, 14, and 28 days. The carbonation test results were analyzed, the variation trend of carbonation depth was analyzed to provide research data for the rational design of hydraulic concrete water cement ratio and water reducing agent dosage under carbonization, and further providing a research basis for predicting the lifespan of hydraulic concrete under carbonization.

Key words: Carbonization; Hydraulic concrete; Durability

0 引言

混凝土碳化导致内部钢筋锈蚀是常见的混凝土破坏现象之一,水利工程的运行环境大多比较严酷,因此水利工程中的混凝土结构更容易因老化而造成破坏,水工混凝土出现开裂、钢筋锈蚀、表面剥落的现象十分常见,有的甚至非常严重,直接影响结构安全稳定,中国每年需投入大量资金对水利工程进行维修养护。根据对全国小型水工混凝土构筑物进行破坏调查发现,钢筋混凝土水闸的闸墩、胸墙、梁等重要结构破坏的比例接近 50%,钢筋混凝土坝体出现破坏的比例也超过 10%,因此水工混凝土的老化破坏必须给与高度

重视。水工混凝土的耐久性及工作寿命直接影响着水利工程的安全运行,笔者通过试验测试不同配合比水工混凝土的碳化深度,并分析碳化深度与混凝土配合比的关系,可为研究水工混凝土耐久性、预测水工混凝土寿命提供研究基础。

1 水工混凝土的碳化机理

1.1 混凝土碳化的基本理论

混凝土碳化是指混凝土中的碳酸化反应生成碳酸盐,进而导致混凝土的酸碱度发生变化。在大气环境下,室外空气中的二氧化碳浓度为 380×10^{-6} ,室内空气中二氧化碳浓度为 $1\ 000 \times 10^{-6}$,与空气中的水共同发生反应导致混凝土 pH 值降低,化学反应方程式如下式:

收稿日期:2023-05-15

$$\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} \tag{1}$$

$$(3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}) + 3\text{CO}_2 \rightarrow (3\text{CaCO}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}) \tag{2}$$

$$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 + 3\text{CO}_2 + \gamma\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{SiO}_2 \cdot \gamma\text{H}_2\text{O} + 3\text{CaCO}_3 \tag{3}$$

$$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 + 2\text{CO}_2 + \gamma\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{SiO}_2 \cdot \gamma\text{H}_2\text{O} + 2\text{CaCO}_3 \tag{4}$$

1.2 水工混凝土碳化的影响因素

水工混凝土碳化的影响因素主要包含:①水泥品种、水泥用量;②水灰比;③掺合料;④外加剂;⑤骨料品种;⑥养护方式;⑦温度;⑧湿度;⑨有害气体的成分、浓度;⑩地下水环境;⑪混凝土的应力状态^[1]。

笔者主要探究水灰比及外加剂两个影响因素与碳化深度之间的关系。

1.3 碳化区的划分

水工混凝土发生碳化后,氢氧化钙会因碳化反应被消耗,因此混凝土碳化区域的 pH 值会降低,从混凝土表面到内部区域 pH 值的分布逐渐增大。可将混凝土碳化区域分成两大区域:完全碳化区和部分碳化区,完全碳化区的 pH 值一般为 7 左右,部分碳化区 pH 值一般(7<pH<12.5)。很多研究从混凝土内部钢筋锈蚀的角度对部分碳化区进行判断,认为(9<pH<11.5)作为判定部分碳化区 pH 值指标较为合适。国外部分研究则通过碳化模型对碳化区的长度进行了划分,影响部分碳化区的主要因素包括:(1)部分碳化产生的原因是二氧化碳的扩散速率超过了碳化反应的速率;(2)在相对湿度较大的湿润环境中,部分碳化的现象较弱,甚至可以忽略,但在相对湿度较小的干燥环境部分碳化的现象则较为明显;(3)在相对湿度较小的干燥环境中,水灰比对部分碳化区长度的影响较大,水灰比增大的同时部分碳化区域长度也会随之增加;在相对湿度较大的湿润环境中,水灰比对部分碳化区长度会有一定的影响,但影响较小;(4)在湿度较低的环境中,水泥用量对部分碳化区长度的影响较大,水泥用量增大的同时部分碳化区域长度也会随之增加;在相对湿度较大的湿润环境中,水泥用量对部分碳化区长度会有一定的影响,但影响较小;(5)二氧化碳的浓度和碳化时间对部分碳化区长度的影响基本可以忽略不计。

1.4 碳化区域的物质组成

(1)根据混凝土碳化化学反应方程式可知,碳化反应是 pH 值降低的过程,氢氧化钙导致 pH 值变化的关系见下式^[2]:

$$\text{pH} = 14 + \lg(4.32 \times 10^{-2} / [\text{Ca(OH)}_2]) / [\text{Ca(OH)}_2]^0 \tag{5}$$

式中 $[\text{Ca(OH)}_2]$ 为碳化混凝土内氢氧化钙的摩尔浓度, mol/m³; $[\text{Ca(OH)}_2]^0$ 为未碳化混凝土内氢氧化钙的摩尔浓度, mol/m³。

(2)国外研究学者建立的碳化模型,其中二氧化碳浓度、氢氧化钙浓度及 pH 值的化学反应方程见下式:

$$\frac{\partial}{\partial x} (D_e \frac{\partial [\text{CO}_2]}{\partial x}) = [\text{CO}_2] (K_{CH} [\text{Ca(OH)}_2] + 3K_{CSH} [\text{CSH}]) \tag{6}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} [\text{Ca(OH)}_2] = -K_{CH} [\text{Ca(OH)}_2] \times [\text{CO}_2] \tag{7}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} [\text{CSH}] = -K_{CSH} [\text{CSH}] \times [\text{CO}_2] \tag{8}$$

式中 x 为碳化区某点到混凝土表面的距离, m; t 为碳化时间, s; $[\text{CO}_2]$ 为混凝土中二氧化碳的摩尔浓度, mol/m³; $[\text{Ca(OH)}_2]$ 为混凝土中氢氧化钙的摩尔浓度, mol/m³; $[\text{CSH}]$ 为混凝土中水化硅酸钙的摩尔浓度, mol/m³; K_{CH} 、 K_{CSH} 为氢氧化钙与水化硅酸钙的碳化反应速率常数, m³/(mol·s)。

上述三个偏微分方程的前提条件:

在 $x = 0$ 处,

$$[\text{CO}_2] = [\text{CO}_2]^0 \tag{9}$$

在混凝土构件中轴线处,

$$\frac{\partial [\text{CO}_2]}{\partial x} = 0 \tag{10}$$

初始条件为 $t = 0$ 时:

$$[\text{CO}_2] = 0 \tag{11}$$

$$[\text{Ca(OH)}_2] = [\text{Ca(OH)}_2]^0 \tag{12}$$

$$[\text{CSH}] = [\text{CSH}]^0 \tag{13}$$

式中 $[\text{CO}_2]^0$ 为二氧化碳的摩尔浓度, mol/m³; $[\text{Ca(OH)}_2]^0$ 、 $[\text{CSH}]^0$ 为未碳化混凝土中氢氧化钙、水化硅酸钙的摩尔浓度, mol/m³。

2 水工混凝土碳化试验设计

2.1 设计依据

根据水工混凝土设计、试验相关规程、规范开展此次试验研究工作。

2.2 材料选取

(1)水泥

P·O52.5 硅酸盐水泥。

(2)粉煤灰

选用的粉煤灰主要指标为：水分含量 3%；烧失量 3.64%；需水量比 94%；细度 18；三氧化硫含量 12%^[3]。

(3)细骨料(砂)

选用细骨料为中砂，砂料为河砂。

(4)粗骨料

选用粗骨料粒径 5~35 mm，品种为卵石。

(5)外加剂

外加剂选用聚羧酸系高效减水剂、液体三萜皂甙引气剂^[4]。

(6)砂率

根据此次试验情况进行混凝土试拌，水灰比为 0.4，得出此次试验砂率为 0.34，砂率测试结果见图 1。

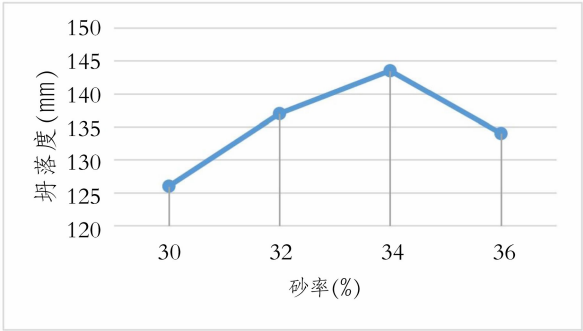


图 1 砂率测试结果

2.3 配合比设计

此次试验主要配置 5 组不同水灰比试件及 5 组不同减水剂掺量试件，水工混凝土配合比见表 1。

表 1 水工混凝土配合比

编号	水灰比	水 /kg·m ⁻³	水泥 /kg·m ⁻³	粉煤灰 /kg·m ⁻³	砂 /kg·m ⁻³	石 /kg·m ⁻³	减水剂 /%	引气剂 /%
A	0.40	150.00	300.00	97.50	592.360	1 211.18	0.8	0.03
B	0.45	150.00	266.67	86.66	608.130	1 234.97	0.8	0.03
C	0.50	150.00	240.00	78.00	620.740	1 265.01	0.8	0.03
D	0.55	150.00	218.18	70.91	631.060	1 269.59	0.8	0.03
E	0.60	150.00	200.00	65.00	639.660	1 282.57	0.8	0.03
F	0.40	137.00	274.00	89.05	616.520	1 252.76	0.9	0.03
G	0.40	125.00	250.00	81.25	638.820	1 291.14	1.0	0.03
H	0.40	121.00	242.00	78.65	646.250	1 303.93	1.1	0.03
I	0.40	116.00	232.00	75.40	655.540	1 319.93	1.2	0.03
J	0.40	109.00	218.00	70.85	668.548	1 342.32	1.3	0.03

2.4 试验步骤

碳化试验应按下列步骤进行^[5]：

(1)首先混凝土试件先经过处理后放入碳化试验箱内，试件间距应不小于 5 cm。

(2)碳化试验箱应进行密封，打开二氧化碳充气阀门，应调节阀门开度控制流量，保证碳化试验箱内二氧化碳浓度为(0%±3%)并在箱内放入去湿硅胶。

(3)在试验的前 48 h，应每隔 2 h 测量二氧化碳浓度及温湿度，超过 48 h 后每 4 h 测量一次，根据测量结果进行调节二氧化碳浓度、温度

及湿度。

(4)测定碳化深度应在混凝土龄期 3 d、7 d、14 d 及 28 d 进行，此次试验采用棱柱体试件，按照每次切开棱柱体长度的一半进行破型，切开的断面保留一半用石蜡进行密封，再进行下一周期试验。

(5)取出的一半试件，首先进行断面清理，确保断面无残留的粉末，再断面上喷洒酚酞酒精(浓度 1%)，放置 30 s 后，用直尺测量断面碳化深度，遇到粗骨料影响测量时，取粗骨料两端碳化深度均值作为测量值，测量精度为 1 mm。

(6)记录每个测定龄期的碳化深度,将同配合比不同组试件(一般为3组)碳化深度测量值求平均值,计算精度为0.1 mm,以此值为混凝土的碳化深度。

3 试验结果及分析

按上述试验设计方案得出此次试验不同配合比碳化试验结果,混凝土碳化深度试验结果见表2。

表2 混凝土碳化深度试验结果/mm

编号	4 d	7 d	14 d	28 d
A	3.00	6.20	7.10	8.30
B	4.10	8.36	12.65	15.40
C	6.39	14.6	19.40	19.55
D	6.50	13.05	18.80	25.40
E	5.42	10.45	17.80	23.15
F	6.36	12.00	11.20	13.6
G	3.35	6.80	13.05	17.35
H	2.97	6.55	10.15	17.75
I	3.55	5.60	11.20	18.85
J	3.65	4.90	12.09	18.90

3.1 不同水灰比与碳化深度的关系

根据试验结果,混凝土的碳化深度随着水灰比的增大而增大,因为混凝土水灰比的增大主要表现为用水量的增大,在混凝土凝固过程中水分会大量蒸发从而在混凝土内部形成细小孔洞或毛细管路,这些孔洞和管路会促进二氧化碳在混凝土中扩散,最终导致混凝土碳化的加速。碳化深度—水灰比关系曲线见图2。

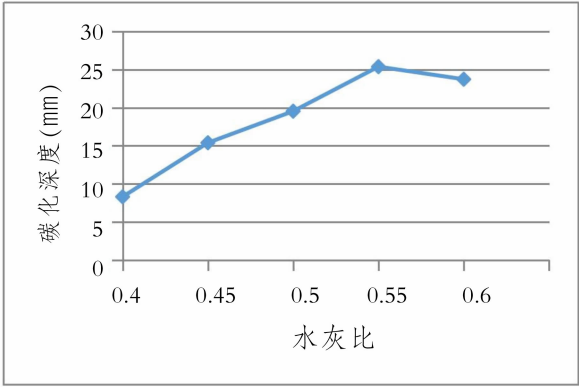


图2 碳化深度—水灰比关系曲线(28 d)

3.2 不同减水剂掺量与碳化深度的关系

根据试验结果,随着减水剂的掺量增大,混凝土的碳化深度也逐步增大,以减水剂掺量1%作

为临界点,当掺量低于1%时,随着减水剂掺量增大,碳化深度增大速度较快,当掺量高于1%时,随着减水剂掺量增大,碳化深度增大速度较为缓慢甚至出现不增大的情况。因为聚羧酸减水剂同时具有引气功能,减水剂掺量增大,混凝土内部的也会形成更多的孔隙,孔隙之间连通后会促进二氧化碳在混凝土内部扩散进而加速碳化,但减水剂掺量超过最佳掺量后,引气效果不会再持续增加,则减水剂的掺量增大对碳化作用影响趋于平稳。碳化深度—减水剂掺量关系曲线见图3。

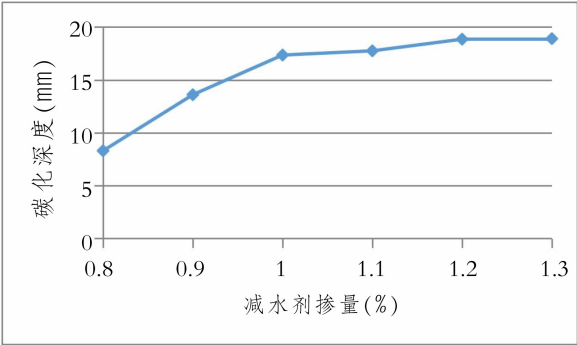


图3 碳化深度—减水剂掺量关系曲线(28 d)

4 结 语

根据此次试验及分析结论可以得出,在实际水利工程应用过程中应尽量避免使用大水灰比的水工混凝土,以减少混凝土碳化破坏的风险,混凝土减水剂最佳掺量应以实际混凝土试验结果确定,当减水剂掺量超过一定比例后对混凝土的碳化耐久性无显著的积极影响。

参考文献:

[1] 张海燕. 混凝土碳化深度的试验研究及其数学模型的建立[D]. 西北农林科技大学硕士论文,2006.

[2] 袁群,何芳婵,李杉. 混凝土碳化理论与研究[M]. 郑州:黄河水利出版社,2009:12-21.

[3] 沙慧文. 粉煤灰混凝土碳化和钢筋锈蚀原因及防止措施[J]. 工业建筑,1989,1(6):7-10.

[4] 缪昌文,刘加平,刘建忠. 外加剂对混凝土耐久性的影响[J]. 东南大学学报,2006,36,(增刊2):253-258.

[5] 王传坤. 混凝土氯离子侵蚀和碳化试验标准化研究[D]. 浙江大学,2010.

作者简介:

车明杰(1989-),男,黑龙江哈尔滨人,工程师,硕士,从事水利工程设计、市政工程设计、工程管理工作。

(责任编辑:廖益斌)