中国工程建设标准化协会

**混凝土结构耐久性室内模拟环境试验方法标准**

Standard for Indoor Simulated Environmental Test Method of

Concrete Structure Durability

**(征求意见稿)**

**CECS XX**

主编部门：

批准部门：

施行日期：

**XX出版社**

**2018 XX**

前言

根据中国工程建设标准化协会[2016]建标协字038号文《关于印发<2016 年第一批工程建设协会标准制订、修订计划>的通知》的要求，由中南大学会同有关高校及科研院所筹建了标准编制组，在广泛调研、认真总结实践经验、参考国外先进标准、广泛征求意见的基础上，共同编制《混凝土结构耐久性室内模拟环境试验方法标准》。

本标准的主要技术内容包括总则、术语和符号、基本规定、大气环境条件下混凝土结构耐久性室内模拟环境试验方法、氯盐环境条件下混凝土结构耐久性室内模拟环境试验方法、硫酸盐环境条件下混凝土结构耐久性室内模拟环境试验方法、冻融环境条件下混凝土结构耐久性室内模拟环境试验方法、环境与荷载共同作用下混凝土结构耐久性室内模拟环境试验方法、自然和室内模拟环境中混凝土结构耐久性相似关系、附录、引用标准名录、本标准用词与用语说明等。

本标准由中国工程建设标准化协会混凝土结构专业委员会归口管理，由中南大学负责解释。在执行过程中如有意见或建议，请寄送解释单位（地址：湖南省长沙市天心区韶山南路中南大学铁道校区22号，邮政编码：410004；Email:lop868@163.com）。

本标准主编单位：

本标准参编单位：

本标准主要起草人：

本标准主要审查人员：

目 次

[1 总则 5](#_Toc520468225)

[2 术语和符号 6](#_Toc520468226)

[2.1 术语 6](#_Toc520468227)

[2.2 符号 7](#_Toc520468228)

[3 基本规定 8](#_Toc520468229)

[3.1 一般规定 8](#_Toc520468230)

[3.2 试件制作及养护 8](#_Toc520468231)

[3.3 基本要求 8](#_Toc520468232)

[3.5 试验报告 9](#_Toc520468233)

[4 大气环境中混凝土结构耐久性室内模拟环境试验方法 11](#_Toc520468234)

[4.1 一般规定 11](#_Toc520468235)

[4.2 试件要求 11](#_Toc520468236)

[4.3 试验设备 11](#_Toc520468237)

[4.4 试验参数 11](#_Toc520468238)

[4.5 试验制度 12](#_Toc520468239)

[4.6 测试内容 12](#_Toc520468240)

[4.7 测试结果与分析 12](#_Toc520468241)

[5 氯盐环境中混凝土结构耐久性室内模拟环境试验方法 14](#_Toc520468242)

[5.1 一般规定 14](#_Toc520468243)

[5.2 试件要求 14](#_Toc520468244)

[5.3 试验设备 14](#_Toc520468245)

[5.4 试验参数 15](#_Toc520468246)

[5.5 试验制度 16](#_Toc520468247)

[5.6 测试内容 17](#_Toc520468248)

[5.7 测试结果与分析 18](#_Toc520468249)

[6 硫酸盐环境中混凝土结构耐久性室内模拟环境试验方法 21](#_Toc520468250)

[6.1 一般规定 21](#_Toc520468251)

[6.2 试件要求 21](#_Toc520468252)

[6.3 试验设备 22](#_Toc520468253)

[6.4 试验参数 22](#_Toc520468254)

[6.5 试验制度 23](#_Toc520468255)

[6.6 测试内容 25](#_Toc520468256)

[6.7 测试结果与分析 25](#_Toc520468257)

[7 冻融环境中混凝土结构耐久性室内模拟环境试验方法 28](#_Toc520468258)

[7.1 一般规定 28](#_Toc520468259)

[7.2 试件要求 28](#_Toc520468260)

[7.3 试验设备 29](#_Toc520468261)

[7.4 试验参数 29](#_Toc520468262)

[7.5 试验制度 30](#_Toc520468263)

[7.6 测试内容 31](#_Toc520468264)

[7.7 测试结果与分析 31](#_Toc520468265)

[8 环境与荷载共同作用下混凝土结构耐久性室内模拟环境试验方法 33](#_Toc520468266)

[8.1 一般规定 33](#_Toc520468267)

[8.2 试件要求 33](#_Toc520468268)

[8.3 试验设备 33](#_Toc520468269)

[8.4 试验参数 34](#_Toc520468270)

[8.5 试验制度 34](#_Toc520468271)

[8.6 测试内容 35](#_Toc520468272)

[8.7 测试结果与分析 35](#_Toc520468273)

[9 自然环境和室内模拟环境中混凝土结构耐久性时间相似关系 37](#_Toc520468274)

[9.1 一般规定 37](#_Toc520468275)

[9.2 基本要求 37](#_Toc520468276)

[9.3 混凝土结构耐久性时间相似关系 37](#_Toc520468277)

[附录 41](#_Toc520468278)

[条文说明 41](#_Toc520468279)

[附表A 检验项目 42](#_Toc520468280)

[附表B 大气环境试验的检测内容 43](#_Toc520468281)

[附表C 氯盐环境试验的检测内容 44](#_Toc520468282)

[附表D 硫酸盐环境试验的检测内容 45](#_Toc520468283)

[附表E 冻融环境试验的检测内容 46](#_Toc520468284)

[附表F 评价指标说明 47](#_Toc520468285)

[本标准用词与用语说明 48](#_Toc520468286)

[引用标准名录 49](#_Toc520468287)

1 总则

1.0.1 为规范混凝土结构耐久性室内模拟环境试验方法，提高混凝土结构耐久性室内模拟环境试验水平，制订本标准。

1.0.2 本标准适用于工程建设中大气、氯盐、硫酸盐、冻融环境作用以及它们和荷载共同作用下的混凝土结构耐久性室内模拟环境试验。

1.0.3 混凝土结构耐久性室内模拟环境试验除应符合本标准外，尚应符合现行国家相关标准的规定。

2 术语和符号

## 2.1 术语

2.1.1混凝土结构耐久性 concrete structure durability

在设计确定的环境作用和维修、使用条件下，结构构件在设计使用年限内保持其适用性和安全性的能力。

2.1.2 混凝土内部微环境 internal micro-environment of concrete

混凝土内部特定小区域空间范围及其中的温度、湿度、pH值等各种因素的总和。它是由某些微细变化而产生的差异所形成的微小环境，有别于混凝土内部其它区域范围。

2.1.3 环境作用 environmental action

温、湿度及其变化以及二氧化碳、氧、盐、酸等环境因素对结构的作用。

2.1.4 模拟环境试验箱 simulate environmental test chamber

能模拟一定环境条件且可通过设定试验参数以获取规定试验条件的密闭箱体或空间。

2.1.5 室内模拟环境 indoor simulated environment

室内或模拟环境试验箱的空间及其中通过设定条件获得的温度、相对湿度、侵蚀介质等各种因素的总和。它是利用特定设施模拟外部环境各种因素、再现环境条件或达到某类作用效应等，有别于外部环境。

2.1.6 室内模拟环境试验 indoor simulated environmental test

在室内模拟环境中为了解某些性能、检验假设或验证理论等而进行的尝试性活动及操作。

2.1.7时间相似率或时间相似关系 similarity ratio or similarity relation of time

本标准具体为自然环境和室内模拟环境试验中混凝土性能指标退化时间与退化速率的比值或相应的函数关系。

2.1.8 混凝土结构 concrete structure

以混凝土为主制成的结构，包括素混凝土结构、钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构。无筋或不配制受力钢筋的混凝土结构为素混凝土结构，钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构在本标准统称为配筋混凝土结构。

## 2.2 符号

——受氯盐侵蚀时间*t*且距混凝土表面*x*处的氯离子含量；

 ——经过侵蚀时间*t*后的混凝土内氯离子扩散系数；

 ——经过碳化时间*t*后的混凝土平均碳化深度；

——*n*次硫酸盐侵蚀室内模拟环境试验后混凝土试件的平均剥蚀深度；

——*n*次冻融循环后混凝土试件单位面积的剥落量；

*n* ——试验循环次数或测点总数；

*t* ——试验时间或侵蚀时间；

——*n*次冻融循环试验后的混凝土试件质量损失率；

——混凝土内氯离子扩散系数随时间的衰减系数；

——自然环境和室内模拟环境中混凝土耐久性相似率。

3 基本规定

## 3.1 一般规定

3.1.1 本标准适用的环境类别，见表3.1.1。

表3.1.1 环境类别

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 序号 | 环境类别 | 劣化特征 |
| 1 | 大气环境 | 混凝土碳化引起混凝土损伤和钢筋锈蚀 |
| 2 | 氯盐环境 | 氯盐导致钢筋锈蚀 |
| 3 | 硫酸盐环境 | 硫酸盐引起混凝土损伤 |
| 4 | 冻融环境 | 反复冻融导致混凝土损伤 |

3.1.2 本方法应根据室内模拟环境和自然环境中混凝土保护层范围内的微环境等效原则确定。若条件不充分时，宜以混凝土表层50mm范围内的微环境等效原则确定。

3.1.3 应按试验对象服役环境类别确定混凝土结构耐久性的主要环境作用因素和次要环境作用因素。

3.1.4 应根据混凝土结构及其服役环境情况调查确定室内模拟环境试验方法。

## 3.2 试件制作及养护

3.2.1 混凝土试件宜采用3个为一组，混凝土结构试件每组应不少于1个。在制作试件时应采用同批次混凝土拌合物。

3.2.2试件的制作、养护、构造措施和裂缝控制等应符合现行国家标准中相关的规定。普通混凝土试件宜养护28d，掺加粉煤灰的混凝土试件宜养护90d。若研究实际工程结构耐久性时,宜采用与实际工程相同的条件制作、养护。

3.2.3 混凝土结构构件应符合《混凝土结构设计规范》GB 50010与《混凝土结构耐久性设计规范》GB/T 50476中相关的材料、混凝土保护层最小厚度和钢筋粘结锚固要求规定。

## 3.3 基本要求

3.3.1 混凝土材料与取样应符合现行国家标准中相关的规定。

3.3.2 试验对象包括素混凝土试件、钢筋混凝土试件和预应力混凝土试件。

3.3.3 试验设备宜包括室内模拟环境实验系统、荷载模拟试验装置和相关的测试仪器。

3.3.4 室内模拟环境实验系统应由模拟环境试验箱、温度控制系统、湿度控制系统和中控系统等组成。

3.3.5 荷载模拟试验装置应能提供满足试验要求的静载荷和动载荷中的一种或两种。

3.3.6 模拟环境试验箱模拟的大气、氯盐、硫酸盐和冻融等环境类别应不少于一种。

3.3.7 模拟环境试验箱的制作材料应具备抗腐蚀能力，不影响试验结果的有效性。

3.3.8 模拟环境试验箱应按试验对象和功能要求明确相应的指标要求：

1 模拟环境试验箱的试验空间容积应不小于试件总体积的2倍。

2 温度控制系统可控制的试验温度应不低于-20℃且不高于80℃，控温精度不应大于3℃，并应能保证温度稳定和均匀。

3 湿度控制系统可控制的相对湿度范围应不小于50%且不大于100%，控湿精度不应大于5%，并能够保证稳定和均匀。

4 中控系统宜具备实时显示试验时间、各测点温度与湿度、平均温度与湿度、循环次数、喷淋时间、断电与停机的记忆及重启继续运行等功能，并以不大于2min的时间间隔自动记录和存储。

3.3.7 室内模拟环境试验系统应具备安全和环境保护系统及防护措施。

3.3.8 试验制度应包括试验参数、试验周期、环境和荷载施加模式、试验终止条件和试验步骤等。

3.3.9 测试内容应包括模拟环境参数、荷载和作用测试等方面，原始试验数据记录与保存应满足相关档案规定要求。

3.3.10 试验检验项目内容，可参照附表A。

## 3.5 试验报告

3.5.1 委托单位提供的内容应包括下列项目：

1 委托单位和见证单位名称。

2 工程名称及施工部位。

3 要求检测的项目名称。

4 要说明的其它内容。

3.5.2 试件制作单位提供的内容应包括下列项目：

1 试件编号。

2 试件制作日期。

3 混凝土强度等级及其配合比。

4 钢筋及预应力钢筋规格及性能。

5 试件的形状及尺寸。

6 原材料的品种、规格和产地及其性能。

7 养护条件。

8 试验龄期。

9 要说明的其它内容。

3.5.3 试验或检测单位提供的内容应包括下列项目：

1 试件收到的日期。

2 试件的形状及尺寸。

3 试验编号。

4 试验日期。

5 仪器设备的名称、型号及编号。

6 试验制度参数。

7 养护条件及试验龄期。

8 混凝土实际强度。

9 测试结果。

10 要说明的其它内容。

4 大气环境中混凝土结构耐久性室内模拟环境试验方法

## 4.1 一般规定

4.1.1 本方法适用于大气环境中混凝土结构碳化室内模拟环境试验。

4.1.2 本方法主要环境作用因素有温度、相对湿度、二氧化碳浓度，次要环境作用因素有风速、降水量、蒸发量、光照等。

## 4.2 试件要求

4.2.1 素混凝土试件尺寸、组数、制作和养护应符合现行国家标准《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082中相关的规定。

4.2.2 配筋混凝土试件应采用长宽比不小于3的棱柱体试件，且以3个试件为一组。

## 4.3 试验设备

4.3.1 试验可采用混凝土碳化试验箱或带碳化功能的室内模拟环境试验箱。

4.3.2 室内模拟环境试验箱内应具备试件架、二氧化碳气体给排系统、风速循环装置、温湿度调控与监测装置以及气体调控与监测装置等。

4.3.3 室内模拟环境试验箱性能指标参数应满足以下要求：

1 温度控制范围应不低于0℃且不高于50℃，温度控制精度应不低于2℃。

2 相对湿度控制范围应不低于50%且不高于100%，相对湿度控制精度应不高于5%，相对湿度升降速率应不小于10%每小时。

3 二氧化碳浓度控制范围应不低于0且不高于100%，浓度精度应不低于0.2%且能实时监测。

4 二氧化碳气体给排系统应包括气体测定传感器、二氧化碳供排气装置、气瓶、压力表及流量计、二氧化碳引入口、气体导出口等。

## 4.4 试验参数

4.4.1 本方法的试验参数取温度、相对湿度和二氧化碳浓度。

4.4.2 通用混凝土碳化试验可参照现行国家标准《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082确定试验温度为（20±2）℃、相对湿度为（70±5）%、二氧化碳浓度为3%。

4.4.3 在条件允许或资料完备的情况下，特定地区混凝土碳化试验宜采用该地区年平均温度值、年平均相对湿度值，二氧化碳浓度宜为3%。

## 4.5 试验制度

4.5.1 试样在标准养护结束后，根据试验要求进行编号、分类，开展试验前应在60℃下烘干48小时。

4.5.2 进行一维碳化侵蚀试验的试样应留一个或两个相对的侧面，开展二维碳化侵蚀试验的试样应留两个相邻面，其余面采用石蜡或环氧树脂密封。试件应在暴露面上沿长度方向以10mm间距画出平行线，作为预定碳化深度的测量点。

4.5.3 试件放置于试验箱试件架上，相邻试件之间及其与试件架的间距应不小于100mm，且与支架接触面的面积应不大于试件该面面积的10%。

4.5.4 应按本标准第4.4节确定的试验温度、相对湿度及二氧化碳浓度等开展试验。

4.5.5 试验进行7天、14天、28天、56天时，应按照现行国家标准《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082中相关的规定取样、制样和测定碳化深度等。

## 4.6 测试内容

4.6.1 室内模拟环境试验箱应自动记录试验过程中的温度、相对湿度、二氧化碳浓度等。试验过程中记录事项见附录B。

4.6.2 清除混凝土试样表面粉末，应按照现行标准《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082中相关的规定测定不同碳化时间下的混凝土碳化深度。碳化深度测量应精确至0.1mm。

## 4.7 测试结果与分析

4.7.1 各试验龄期的混凝土平均碳化深度应按照式（4.7.1）计算：

 （4.7.1）

式中：——试件碳化*t*（天）后的平均碳化深度（mm），精确至0.1mm；

*di*­——各测点的碳化深度（mm），精确至0.1mm；

*n*——测点总数。

4.7.2 每组应以3个碳化试件的碳化深度算术平均值作为该组混凝土试件碳化测定值，按照式（4.7.2）计算：

 （4.7.2）

式中：——该组混凝土试件碳化*t*（天）后的碳化深度（mm），精确至0.1mm；

、、——该组三个混凝土试件的平均碳化深度（mm），精确至0.1mm。

# 5 氯盐环境中混凝土结构耐久性室内模拟环境试验方法

## 5.1 一般规定

5.1.1 本方法适用于氯盐环境条件下混凝土结构耐久性室内模拟环境试验。

5.1.2 混凝土结构耐久性的氯盐环境分类及其模拟试验方式应按表5.1.2确定。

表5.1.2 环境分类及其模拟试验方式

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 环境分类编号 | 环境条件 | 结构构件示例 | 模拟试验方式 |
| A | 海洋水下区和土中区；  永久浸没于海水或埋于土中 | 桥墩、桩基、基础 | 全浸泡试验 |
| B | 海洋潮汐区；  直接接触海水且有干湿交替 | 海中桥墩、承台 | 干湿交替试验 |
| C | 海洋浪溅区；  受到海水溅射且有干湿交替 | 海中桥墩、下索塔 |
| D | 海洋大气区；  接触空气中盐分，不与海水直接接触 | 桥墩、桥梁及其上部结构构件 | 盐雾试验 |

5.1.3 本方法主要环境作用因素有温度、氯离子浓度、干湿时间比例，次要环境作用因素有相对湿度、风速、降水量、光照等。

## 5.2 试件要求

5.2.1 素混凝土试件宜采用尺寸为100mm×100mm×100mm的立方体试件，每组试件数量应不少于3个。

5.2.2 配筋混凝土试件宜采用尺寸为100mm×100mm×300mm的棱柱体试件，埋置钢筋应采用直径不小于6.5mm的普通低碳钢热扎钢筋（Q235），每组试件数量应不少于3个。

5.2.3 混凝土和钢筋材料应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010中相关的规定。

## 5.3 试验设备

5.3.1 盐雾试验可采用盐雾试验箱或带盐雾功能的室内模拟环境试验箱。

5.3.2 全浸泡试验可采用能维持一定液面高度的恒温水池或溶液箱。

5.3.3 干湿交替试验宜采用带喷淋装置的室内模拟环境试验箱。

5.3.4 喷淋装置应包括盐雾喷头、溶液喷头、溶液存储池与滤网、溶液预热与给排放管道等。盐雾沉降量应为1-2mL/(80cm2˙h)，溶液喷淋量应为100mL/(cm2˙min)，喷雾和喷淋方式应为连续或周期形式。

5.3.5 室内模拟环境试验箱性能指标参数应满足以下要求：

1 温度控制范围应不低于0℃且不高于70℃，温度控制精度应不大于1℃。

2 相对湿度控制范围应不低于50%且不高于100%，相对湿度控制精度宜不高于5%。

3 循环风速应不小于3m/s。

4 盐溶液喷淋方式可为连续或周期间歇形式。

5.3.6 混凝土中氯离子含量测定所用设备指标参数应符合现行国家标准《混凝土质量控制标准》GB 50164中相关的规定。

## 5.4 试验参数

5.4.1 不同氯盐环境中混凝土耐久性模拟试验方式应按表5.4.1确定。

表5.4.1 模拟试验方式

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 环境分类编号 | 模拟试验方式 | 控制参数 |
| A | 全浸泡试验 | 温度、溶液浓度 |
| B | 干湿交替试验 | 温度、溶液浓度、干湿比例 |
| C | 温度、湿度、溶液浓度、干湿比例 |
| D | 盐雾试验 | 温度、湿度、溶液浓度、喷雾时间 |

5.4.2 盐溶液应采用质量浓度为5%的NaCl溶液。

5.4.3 试验温度应根据混凝土水胶比和服役环境温度，按表5.4.3确定。

表5.4.3 试验温度

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 试验温度 w/c  自然温度 | 0.3 | 0.4 | 0.5 |
| 0 | 17 | 18 | 19 |
| 5 | 22 | 23 | 25 |
| 15 | 34 | 35 | 37 |
| 25 | 45 | 46 | 48 |
| 35 | 57 | 57 | 60 |

注：w/c表示水胶比，即水和胶凝材料用量之比。表中试验温度是在自然温度基础上，考虑温度对混凝土内氯离子扩散系数加速倍数为4时计算出的结果。

5.4.4 全浸泡试验应按照本标准第5.4.1条和第5.4.2条确定的试验温度和溶液浓度进行，试验过程中保持室内模拟环境试验箱内相对湿度宜不低于90﹪。

5.4.5 干湿交替试验的喷淋过程中模拟环境相对湿度宜为100%。干燥过程模拟环境相对湿度宜不小于80%且不大于85%，并且相对湿度达到设定值所需时间应不大于24小时。

5.4.6在条件允许或资料完备的情况下，盐雾试验的试验周期、喷雾过程和干燥过程之间的时间比可由混凝土结构服役环境确定。在条件不充分情况下，盐雾试验可采用一个试验循环周期为24小时，试验喷雾持续时间和间歇时间宜采用15分钟为一时间段交替进行且持续21小时、室温下通风干燥3小时。

5.4.7在条件允许或资料完备的情况下，干湿交替试验的试验周期、干燥过程和润湿过程之间的时间比可由混凝土结构服役环境确定。在条件不充分情况下，干湿交替试验可采用一个试验循环周期为72小时，试验喷淋过程宜为50分钟、干燥过程宜为71小时10分钟。

5.4.8 干湿循环试验的干燥过程模拟环境采用的循环风速应不小于3m/s。

## 5.5 试验制度

5.5.1 试验制度应包括试验准备、试验环境参数误差控制、试验数据采样频率、试验停止条件、混凝土结构氯盐侵蚀室内模拟环境试验步骤等。

5.5.2 试验开始前应进行设备运行调试与标定、试件处理与摆放、溶液配制、试样架或溶液箱放置等。

5.5.3 试验环境参数精度控制包括试验温度、相对湿度、喷淋量、干燥时间、喷淋或喷雾时间等。

5.5.4 干湿循环试验宜以10个试验周期及其整数倍、全浸泡试验宜以10天及其整数倍为基准进行取样。

5.5.5 当试验出现下列情况之一时，可停止试验：

1配筋混凝土试件内部钢筋锈蚀。

2 达到设定的试验次数。

5.5.6 室内模拟环境试验应按下列步骤进行：

1 试样在标准养护28天结束后，应根据试验要求进行编号、分类。

2 进行一维氯盐侵蚀试验的试样应留一个或两个相对的侧面，开展二维氯盐侵蚀试验的试样应留两个相邻面，其余试样表面宜采用环氧树脂密封。

3 将处理后的试样置于试件架上，试样之间及其与试件架周边距离应不小于100mm。干湿循环和盐雾试验中试样的侵蚀表面应水平放置且能充分接触溶液或盐雾。

4 根据混凝土结构所处的服役环境，应按表5.1.2中环境分类确定模拟试验方式。应按照表5.4.1确定模拟试验的控制参数，并应按5.4确定试验参数值。

5 根据模拟试验方式，应按照表5.5.6实验步骤进行试验。

6 根据试验要求完成若干次试验后，应及时取出试样、测定混凝土试样中氯离子含量分布。

表5.5.6 不同模拟试验方式的实验步骤

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 环境分类编号 | 模拟试验方式 | 实验步骤 |
| A | 全浸泡试验 | 试件放入恒温水池或溶液箱中试样架上，注入盐溶液且保证液面高于试件表面应不小于20mm。根据第4步选定的温度和溶液浓度等试验参数开展试验。 |
| B | 干湿循环试验 | 试件置于模拟环境箱中试样架上，根据第4步选定的温度、湿度、循环周期、干湿时间比、溶液浓度等试验参数开展干湿循环试验。 |
| C |
| D | 盐雾试验 | 将制备好的试件放入盐雾试验箱或室内模拟环境试验箱中试样架上，根据第4步选定的温度、试验周期、盐雾喷淋时间、溶液浓度等试验参数开展试验。 |

## 5.6 测试内容

5.6.1 室内模拟环境试验箱宜自动记录试验过程中的温度、相对湿度、试验周期等。宜每3天检测、调整溶液浓度，且每两周更换一次溶液。试验过程中记录事项见附表C。

5.6.2 将直径10cm、表面积80cm2的漏斗采用橡胶塞固定于50mL量筒上，持续喷雾应不少于16小时，测定喷雾量并换算为单位时间和单位面积的盐雾沉降量。

5.6.3 按照每2mm深度进行混凝土中氯离子含量的取样和测定，检测应符合现行行业标准《混凝土中氯离子含量检测技术规程》JGJ/T 322中相关的规定。

5.6.4 应按照每10个试验周期或30天为一时间段测定钢筋锈蚀电流密度，且以钢筋锈蚀电流密度0.1uA/cm2作为阈值来确定钢筋起锈时间。

5.6.5 钢筋锈蚀情况的电化学测定方法应符合现行国家标准《建筑结构检测技术标准》GB/T 50344中相关的规定。钢筋锈蚀状态可通过试件破型后采用失重法测定，测定方法应符合现行标准《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082中相关的规定。

## 5.7 测试结果与分析

5.7.1 试验报告应给出试样内不同深度处的氯离子含量、钢筋腐蚀电流密度、钢筋锈蚀失重量、钢筋锈蚀电位等。

5.7.2 根据本标准第5.6节测定结果绘制混凝土内氯离子含量分布曲线。

5.7.3 混凝土内氯离子扩散系数*D*、混凝土表面氯离子含量和氯离子对流区深度应根据试验测试结果按式（5.7.3）拟合确定：

 （5.7.3）

式中：——混凝土遭受氯盐侵蚀时间*t*且距表面*x*处的氯离子含量（％）；

——混凝土初始条件下的氯离子含量（％）；

——混凝土表面氯离子含量（％）；

——混凝土表面氯离子对流区深度（m）；

*D* ——混凝土内氯离子扩散系数（m2/s）；

*t* ——混凝土遭受氯盐侵蚀时间（s）。

5.7.4 自然环境中混凝土内氯离子扩散系数随时间变化可按式（5.7.4）确定：

 （5.7.4）

式中： ——受氯盐侵蚀时间*t*的混凝土内氯离子扩散系数（m2/s）；

——养护28天时混凝土内的氯离子扩散系数（m2/s）；

——混凝土内的氯离子扩散系数随时间衰减系数。

5.7.5 自然环境中混凝土表面氯离子含量随时间变化可按式（5.7.5）确定：

 （5.7.5）

式中：*t* ——混凝土受氯盐侵蚀时间（a）；

*a*、*b*——拟合常数。

5.7.6 混凝土内钢筋锈蚀临界氯离子含量宜根据所处服役环境中既有工程调查确定。当缺少可靠资料或条件不充分时，可根据现行标准《既有混凝土结构耐久性评定标准》中相关的规定确定，见表5.7.6。

表5.7.6 钢筋锈蚀临界氯离子含量*C*cr（kg/m3）

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| *f*cu,e（MPa） | ≥40 | 35 | ≤30 |
| 近海大气与海洋盐雾区 | 2.10 | | |
| 浪溅区 | 1.70 | 1.50 | 1.30 |
| 水位变动区 | 2.10 | | |
| 除冰盐环境及其它氯化物环境 | 1.30~2.10 | | |

5.7.7 混凝土内距表面深度*x*处达到钢筋锈蚀临界氯离子含量的时间可按式（5.7.7）计算：

 （5.7.7）

式中：——距混凝土表面深度*x*处钢筋锈蚀的临界氯离子含量，可根据本标准第5.7.6条确定。

5.7.8 钢筋质量损失率应按式（5.7.8）计算：

 （5.7.8）

式中：——*n*次循环试验后混凝土构件内单位长度的钢筋质量损失率（%）；

——试验前混凝土构件内钢筋单位长度的质量（g）；

——*n*次循环试验后混凝土试件内单位长度的钢筋质量（g）。

5.7.9钢筋锈蚀电流密度增加率应按式（5.7.9）计算：

 （5.7.9）

式中：——*n*次循环试验后混凝土构件内钢筋锈蚀电流密度增加率（%）；

——试验前混凝土构件内钢筋腐蚀电流密度（uA/cm2）；

——*n*次循环试验后混凝土试件内钢筋锈蚀电流密度（uA/cm2）。

6 硫酸盐环境中混凝土结构耐久性室内模拟环境试验方法

## 6.1 一般规定

6.1.1 本方法适用于硫酸盐环境条件下混凝土结构耐久性室内模拟环境试验。

6.1.2 混凝土结构耐久性的硫酸盐环境分类及其模拟试验方式应按表6.1.2确定。

表6.1.2 环境分类及其模拟试验方式

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 环境分类编号 | 环境条件 | 结构构件示例 | 模拟试验方式 |
| A | 土中和水中区；  土中及地表、地下水中 | 桥墩、桩基、基础等与等土体、地下水、地表水接触的结构构件 | 全浸泡试验 |
| B | 干湿交替区；  直接接触水且有干湿交替 | 桥墩、承台、桩基、基础、电线杆、墙、柱等 | 干湿循环试验 |
| C | 半埋入和半浸泡区；  部分埋入土中、浸泡于水中而另一部分暴露于大气中，且有干湿交替 | 桥墩、桩基、基础、电线杆、墙、柱等 |
| D | 大气区；  接触空气中盐分，不与盐溶液直接接触 | 梁、柱、桥及其上部结构构件 |

6.1.3 本方法主要环境作用因素有温度、相对湿度、风速、硫酸盐种类与浓度等，次要环境作用因素有荷载、降水量、蒸发量、光照等。

## 6.2 试件要求

6.2.1 素混凝土试件的尺寸、组数、制作和养护应符合《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082中相关的规定。

6.2.2 配筋混凝土试件应采用长宽比应不小于3的棱柱体试件，且以3个试件为一组。

6.2.3 混凝土结构试件横截面尺寸、公差、制作和养护应符合《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082中相关的规定。材料、混凝土保护层最小厚度和钢筋粘结锚固要求等应符合《混凝土结构设计规范》GB 50010与《混凝土结构耐久性设计规范》GB/T 50476中相关的规定。

## 6.3 试验设备

6.3.1 室内模拟环境试验箱性能指标参数应满足以下要求：

1 温度控制范围应不低于0℃且不高于70℃，温度控制精度应不大于1℃，并且升降温速率应不低于10℃每小时。

2 相对湿度控制范围应不低于50%且不高于100%，相对湿度控制精度应不高于5%，并且相对湿度升降速率应不低于10%每小时。

3 循环风速应不小于3m/s。

4 溶液最大喷淋量应不少于100mL/（cm2•min），喷淋方式应为连续或周期间歇形式。

6.3.2 硫酸根离子含量测定所用设备指标参数应符合现行国家标准《混凝土结构耐久性设计规范》GB/T 50476中相关的规定。

6.3.3 混凝土试件膨胀量测定所用千分表量程应不小于5mm，精度应不低于0.01mm。混凝土试件重量测定所用电子称量程应不小于20kg、精度应不低于1g。试件尺寸测定所用游标卡尺精度应不小于0.02mm。

## 6.4 试验参数

6.4.1 不同硫酸盐环境中混凝土侵蚀的模拟试验方式应按表6.4.1确定。

表6.4.1 模拟试验方式

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 环境分类编号 | 模拟试验方式 | 控制参数 |
| A | 全浸泡试验 | 温度、溶液浓度 |
| B | 干湿循环试验 | 温度、湿度、溶液浓度、试验周期、干湿比例 |
| C |
| D |

6.4.2 试验采用的硫酸盐应为化学纯无水硫酸钠。盐溶液浓度应根据实际工程中混凝土硫酸盐侵蚀机理和破坏类型确定。若混凝土发生钙矾石类型侵蚀破坏，则盐溶液浓度宜为2%。若混凝土发生石膏和盐析晶类型侵蚀破坏，则盐溶液浓度宜为5%或10%。

6.4.3 试验过程中硫酸盐溶液pH值宜不低于6且不高于9，并且应每两周更换一次溶液。

6.4.4在条件允许或资料完备的情况下，模拟环境试验的温度及其持续时间比可由混凝土结构服役环境按照式（6.4.4）计算确定。在条件不充分情况下，干湿交替试验可采用一个试验循环周期为72小时，采用三个阶段的温度宜为30℃、40℃和50℃，且各温度阶段持续时间为30小时、12小时和30小时。全浸泡试验可采用一个试验循环周期为24小时，温度宜为30℃。

 （6.4.4）

式中：*D*0——温度*T*0时的混凝土内硫酸根离子扩散系数（m2/s）；

*D*——温度*T*时的混凝土内硫酸根离子扩散系数（m2/s）；

*R*——理想气体常数（J/(mol˙K)），推荐值为8.314J/(mol˙K)；

——温度对混凝土内硫酸根离子扩散系数的加速倍数；

*E*a——混凝土内硫酸根离子扩散活化能（kJ/mol），推荐值为58.2kJ/mol。

6.4.5 在试验条件允许情况下，干湿交替试验的试验周期、干燥过程和喷淋过程之间的时间比可由混凝土结构服役环境确定。在试验条件不充分情况下，干湿交替试验可采用一个试验循环周期为72小时，喷淋过程时间宜为1小时且在30℃温度段内、干燥过程时间宜为71小时。

6.4.6 干湿循环试验的干燥过程相对湿度宜为50%，喷淋过程中的相对湿度宜不小于95%。全浸泡试验过程中模拟环境试验箱内环境相对湿度宜不低于90%。

6.4.7 干湿循环试验过程中室内模拟环境试验箱内的循环风速应不小于3m/s。

## 6.5 试验制度

6.5.1 试验制度应包括试验准备、试验环境参数误差控制、试验数据采样频率、试验停止条件和混凝土结构耐久性室内模拟环境试验步骤等。

6.5.2 试验开始前应开展设备运行调试与标定、试件处理与摆放、溶液配制、试样架或溶液箱放置等。

6.5.3 试验环境参数精度控制应包括试验温度、相对湿度、喷淋量、循环风速、溶液浓度、循环周期、温度与相对湿度的升降速率等。

6.5.4 干湿循环试验宜以10个试验周期及其整数倍、全浸泡试验宜以10天及其整数倍为基准进行取样。

6.5.5 当试验出现下列情况之一时，可停止试验：

1 混凝土抗压强度耐蚀系数达到75%。

2 配筋混凝土试件截面剥蚀深度达到钢筋保护层厚度。

3 达到设定的试验次数。

6.5.6 混凝土结构耐久性室内模拟环境试验应按照下列步骤进行：

1 试样在标准养护28天结束后，应根据试验要求进行编号、分类。

2 进行一维硫酸盐侵蚀试验的试样应留一个或两个相对的侧面，开展二维硫酸盐侵蚀试验的试样应留两个相邻面，其余试样表面宜采用环氧树脂密封。

3 将处理后的试样置于试件架上，试样架与试件之间接触面积小于试样面积的10%、且试样之间及其与试件架周边距离应不小于100 mm。干湿循环试验中试样的侵蚀表面应水平放置且能充分接触溶盐液。

4 试验开始前应调整室内模拟环境试验箱内温度为30℃且维持6h以上，并确保各处温度相同。

5 根据混凝土结构所处的服役环境，应按表6.1.2和表6.4.1确定模拟试验方式及控制参数，并根据本标准第6.4节确定试验参数值。

6 根据模拟试验方式，应按照表6.5.6实验步骤进行试验。

7 根据试验要求完成若干次试验后，应及时取出试样、测定试样性能。同时，观察经过试验后试样外观形貌的损伤、劣化等情况，并进行详细地描述和记录。

表6.5.6 不同模拟试验方式的实验步骤

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 环境分类编号 | 模拟试验方式 | 实验步骤 |
| A | 全浸泡试验 | 试件放入恒温水池或溶液箱中试样架上，注入盐溶液且保证液面高于试件表面应不小于20 mm，并且保证放入溶液的时间应不超过30分钟。根据本条第5步选定的温度和溶液浓度等试验参数开展试验。 |
| B | 干湿循环试验 | 试件置于模拟环境箱中试样架上，根据本条第4步选定的温度、湿度、循环周期、循环风速、溶液浓度等试验参数开展干湿循环试验。 |
| C |
| D |

## 6.6 测试内容

6.6.1 室内模拟环境试验箱宜自动记录试验过程中的温度、相对湿度、喷淋时间、干燥时间、试验周期等。同时，宜每3天检测、调整溶液pH值和浓度，且每两周更换一次溶液。试验过程中记录事项见附录D。

6.6.2 混凝土内硫酸根离子含量测定应按照《混凝土结构耐久性设计规范》GB/T 50476中相关的规定

6.6.3 混凝土试件强度、质量、膨胀率等测定应按照《普通混凝土力学性能试验方法标准》GB/T 50081和《水泥抗硫酸盐侵蚀试验方法》GB/T 749中相关的规定。

6.6.4 混凝土试件的截面剥蚀深度、极限承载力、裂缝等测定应按照《混凝土结构试验方法标准》GB/T 50152中相关的规定。

## 6.7 测试结果与分析

6.7.1 试验报告应给出混凝土抗压强度、重量、膨胀量、截面剥蚀深度、混凝土内硫酸盐含量、极限承载力等试验结果。

6.7.2 混凝土抗压强度耐蚀系数应按式（6.7.2）计算：

 （6.7.2）

式中：——*n*次试验循环后的混凝土抗压强度耐蚀系数（%），精确至0.1%；

——对比用的一组混凝土试件的抗压强度测定值（MPa），精确至0.1MPa；

——*n*次试验循环后的混凝土试件抗压强度测定值（MPa），精确至0.1MPa。

6.7.3 混凝土试件重量损失率应按式（6.7.3）计算：

 （6.7.3）

式中：——*n*次试验循环后的混凝土重量损失率（%），精确至0.01%；

——混凝土试件侵蚀试验前的重量测定值（g），精确至0.1g；

——*n*次试验循环后的试件重量测定值（g），精确至0.1g。

6.7.4 混凝土试件膨胀率应按式（6.7.4）计算：

 （6.7.4）

式中：——*n*次试验循环后的混凝土试件膨胀率（%），精确至0.01%；

——混凝土试件的初始长度测定值（mm），精确至0.01mm；

——*n*次试验循环后的混凝土试件长度测定值（mm），精确至0.01mm。

6.7.5 混凝土试件截面剥蚀深度应按式（6.7.5）计算：

 （6.7.5）

式中：——*n*次试验循环后的混凝土试件平均剥蚀深度（mm），精确至0.01mm；

——*n*次试验循环后的混凝土试件横截面上第*i*个点的剥蚀深度测定值（mm），精确至0.01mm。

6.7.6 混凝土内硫酸根离子含量变化率应按式（6.7.6）计算：

 （6.7.6）

式中：——*n*次试验循环后的混凝土试件深度*x*处的硫酸根离子含量变化率（%），精确至0.01%；

——*n*次试验循环后的混凝土试件深度*x*处的硫酸根离子含量（%），精确至0.01%；

——初始混凝土试件深度*x*处的硫酸根离子含量（%），精确至0.01%。

6.7.7 混凝土试件极限承载力降低率应按式（6.7.7）计算：

 （6.7.7）

式中：——*n*次试验循环后的混凝土试件极限承载力降低率（%），精确至0.1%；

——对比用的一组混凝土试件极限承载力测定值（kN），精确至1N；

——*n*次试验循环后的混凝土试件极限承载力测定值（kN），精确至1N。

# 7 冻融环境中混凝土结构耐久性室内模拟环境试验方法

## 7.1 一般规定

7.1.1 本方法适用于冻融环境中混凝土结构抗冻性和抗盐冻性能室内模拟环境试验。

7.1.2 混凝土结构耐久性的冻融环境分类及其模拟试验方式应按表7.1.2确定。

表7.1.2 环境分类及其模拟试验方式

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 环境分类编号 | 环境条件 | 结构构件示例 | 模拟试验方式 |
| A | 微冻地区的无盐环境 | 微冻地区的水位变动区构件和频繁受雨淋的构件水平表面 | 抗冻性试验法（气冻水融法） |
| B | 严寒和寒冷地区的无盐环境 | 严寒和寒冷地区受雨淋构件的竖向表面、水位变动区构件和频繁受雨淋的构件水平表面 |
| C | 微冻地区的有盐环境 | 有氯盐微冻地区的水位变动区构件和频繁受雨淋的构件水平表面 | 抗盐冻性试验法（盐冻法或单面冻融法） |
| D | 严寒和寒冷地区的有盐环境 | 有氯盐严寒和寒冷地区受雨淋构件的竖向表面、水位变动区构件和频繁受雨淋的构件水平表面 |

7.1.3 本方法主要环境作用因素有冻结温度和融化温度、盐溶液浓度等，次要环境作用因素有相对湿度、风速等。

## 7.2 试件要求

7.2.1 素混凝土试件应采用100mm×100mm×400mm的棱柱体试件。抗冻性试验每组试件数量应不少于3个，盐冻性试验每组试件数量应不少于5个。

7.2.2 配筋混凝土结构构件公差、制作和养护应符合《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082中相关的规定。混凝土结构构件的最小横截面尺寸宜不大于400mm，或构件内温度测点距最近表面距离宜不大于200mm。

7.2.3 对于有特殊要求、非标准尺寸的配筋混凝土结构构件，可采用缩尺或足尺的混凝土结构试件，但应符合本标准第7.2.2条中相关的规定。

## 7.3 试验设备

7.3.1 冻融试验可采用冻融试验箱或带冻融功能的室内模拟环境试验箱。

7.3.2 冻融试验中室内模拟环境试验箱内温度应能维持恒定的冻结和融化温度。最低温度应不低于-20℃且不高于-18℃，且试验过程中试验箱内各处温度差应不大于3℃。

7.3.3 升降温控制系统应确保冻融循环符合现行国家标准《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082中相关的规定。

7.3.4 超声波测定仪频率范围应不小于50kHz且不大于150kHz，换能器应为平面换能器且性能要求应符合现行国家标准《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082中相关的规定。

7.3.5 称量试件的设备最大量程应不小于20kg，精度应不低于1g。称量试件表面剥落颗粒质量的设备精度应不低于0.01g。

7.3.6 试验箱内温度传感器的检测范围不应小于（-20~20）℃，测量精度为0.5℃。

## 7.4 试验参数

7.4.1 不同冻融环境的模拟试验方式和控制参数应按表7.4.1确定。

表7.4.1 模拟试验方式和控制参数

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 环境分类编号 | 模拟试验方式 | 控制参数 |
| A | 抗冻性试验法（气冻水融法） | 冻结温度、融化温度 |
| B |
| C | 抗盐冻性试验法（盐冻法或单面冻融法） | 冻结温度、融化温度、盐溶液浓度 |
| D |

7.4.2 冻融试验的冻结温度宜根据服役环境正负温交替季节的平均日最低气温确定（或最冷月的平均日最低气温）。当正负温交替季节的平均日最低气温高于-10℃时，冻结温度宜为（-10±2）℃。当最冷月的平均日最低气温低于-18℃时，冻结温度宜为（-18±2）℃。

7.4.3 在试验条件允许情况下，冻融试验的融化温度宜根据服役环境正负温交替季节的平均日最高气温确定。在试验条件不充分情况下，可取融化温度为（5±2）℃。

7.4.4 盐冻法试验宜采用质量浓度为3%的NaCl溶液。

## 7.5 试验制度

7.5.1 试验制度应包括试验准备、环境参数误差控制、数据采样频率、试验停止条件、试验步骤等。

7.5.2 试验开始前应进行设备运行调试与标定、试件处理与摆放、溶液配制、试样架或溶液箱放置等。

7.5.3 试验环境参数精度控制应包括试验温度、相对湿度、喷淋量、溶液浓度等。

7.5.4 试件抗冻性试验宜采用每25次循环为一个测试周期，而抗盐冻性试验宜采用5次循环为一个测试周期。

7.5.5当试验出现下列情况之一时，可停止试验：

1 混凝土试件表面剥落量大于1.5kg/m2。

2 混凝土试件相对动态弹性模量低于60%。

3 达到设定的试验次数。

7.5.6 试验应按下列步骤进行：

1 试件在标准养护24天结束时进行编号、分类，并放入（20±2）℃水中浸泡4天，液面应高于试件表面20mm。

2 在28天龄期结束时，将试件置于试验箱内的试件架上且在混凝土试件底部放置收集剥落颗粒的浅盘，试件底部与浅盘间垫支钢筋接触面积应不大于10%，试件之间及其与试验箱周边距离应不小于100mm。

3 根据混凝土结构所处的服役环境，应按表7.1.2中环境分类确定模拟试验方式。按照表7.4.1确定模拟试验的控制参数，并应按7.4确定的试验参数进行冻融循环试验。

4 试验冻结时间应以试验箱内温度达到冻结温度开始计时，试验过程中温度应维持冻结温度且冻结时间应不小于4小时。

5 试验箱应采用加热升温方式开展混凝土试件融化试验，并应同时进行喷淋水或NaCl溶液。试验箱内空气、喷淋水或溶液的温度宜维持（5±2）℃。融化时间应不小于4h，达到融化时间后可进入下一次冻融循环试验。

6 根据试验要求完成若干次试验后，应及时取出试样、测定混凝土试样性能。

## 7.6 测试内容

7.6.1 室内模拟环境试验箱宜自动记录试验过程中的温度、时间、试验周期等。同时，应每两周检测、调整一次盐溶液浓度。试验过程中记录事项见附录E。

7.6.2 试验前应测定混凝土试件尺寸、外观形貌等。在试验条件允许情况下，还可测定试验前混凝土试样重量。每25次冻融循环后，应清除混凝土结构表面疏松物并测定试样尺寸、外观形貌和浅盘中试样表面剥落物重量。

7.6.3 试验应采用超声波测定仪测试超声波通过混凝土试样长边的声时，且宜采用换能器直接相对法标定零声时。若混凝土试样长边无平行侧面时，可选取短边平行侧面测量。测点应不少于3个且在距表面50mm处均匀分布。

## 7.7 测试结果与分析

7.7.1 试验报告应给出混凝土表面剥落物重量、冻融前后混凝土试件超声波波速和声时等试验结果，见附表D。

7.7.2 混凝土试件表面单位面积剥落量应按式（7.7.2）计算：

 （7.7.2）

式中：*mn*——*n*次冻融循环后，单个混凝土试件单位面积剥落量（g/m2），精确至0.01g；

*μ*s——混凝土试件表面剥落颗粒质量（g），精确至0.01g；

*A* ——单个混凝土试件测试表面的表面积（mm2），精确至0.1 mm2。

7.7.3 混凝土试件的超声波相对动弹性模量变化应按式（7.7.3）计算：

 （7.7.3）

式中：*Pi*——*n*次冻融循环后混凝土试件相对动弹性模量（%），精确至0.01%；

*t*n——*n*次冻融循环后混凝土试件的超声波波时（μs），精确至0.1μs；

*t*0——冻融循环试验前混凝土试件的超声波波时（μs），精确至0.1μs。

7.7.4 混凝土试件质量损失率应按式（7.7.4）计算：

 （7.7.4）

式中：——*n*次冻融循环后第*i*个混凝土试件的质量损失率（%），精确至0.01%；

——冻融循环试验前第*i*个混凝土构件质量（g），精确至0.01g；

——*n*次冻融循环后第*i*个混凝土构件质量（g），精确至0.01g。

# 8 环境与荷载共同作用下混凝土结构耐久性室内模拟环境试验方法

## 8.1 一般规定

8.1.1 本方法适用于表3.1.1中规定的典型环境与荷载共同作用下混凝土结构耐久性室内模拟环境试验。

8.1.2 本方法考虑的荷载包括静力荷载和疲劳荷载。

8.1.3 本方法目的是探讨荷载效应对环境作用下混凝土结构耐久性劣化影响、环境效应对荷载作用下混凝土结构受力和变形等性能的影响。

8.1.4 本方法应能反映混凝土结构的典型受力特征和环境作用效应。

## 8.2 试件要求

8.2.1 混凝土结构试件可采用足尺或缩尺模型。

8.2.2 混凝土结构试件的制作和养护应符合现行国家标准《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082和《混凝土结构工程施工规范》GB 50666中相关的规定。

8.2.3 混凝土结构试件的材料、混凝土保护层最小厚度和钢筋粘结锚固要求等应符合《混凝土结构设计规范》GB 50010与《混凝土结构耐久性设计规范》GB/T 50476中相关的规定。

## 8.3 试验设备

8.3.1 试验设备应包括室内模拟环境试验设备和荷载模拟试验装置。

8.3.2 室内模拟环境试验设备应与第4~7章中典型环境规定的试验设备相同，并且还应满足荷载模拟试验装置规定的使用条件。

8.3.3 荷载模拟试验装置主要包括静力和疲劳荷载加载系统。

8.3.4 荷载加载系统应满足持续加载需要，并且应采取防锈措施。

8.3.5 疲劳荷载加载系统应由疲劳试验机和加力架构成，疲劳试验机可为脉动式疲劳试验机或电液伺服疲劳试验机。

8.3.6 疲劳荷载模拟试验设备性能指标应满足下列要求:

1 疲劳试验机的荷载量程应满足疲劳试验的上限和下限荷载要求，等幅或多级变幅疲劳试验的下限荷载应不小于试验机最大动荷载的3%，上限荷载不应大于最大动负荷的90%。

2 疲劳试验机的荷载精度应满足试验要求，电液伺服疲劳试验机的荷载量测误差应不超过量程的±1.5%，脉动式疲劳试验机的荷载量测误差应不超过量程的±2.0%。

3 疲劳试验机的加载频率范围应满足等幅或多级变幅疲劳试验要求，提供加载频率应小于0.8或大于1.3倍的试件和加载装置自振频率。

## 8.4 试验参数

8.4.1 试验的模拟环境参数应按照本标准第4章至第7章中相关的规定确定。

8.4.2 试验的荷载参数应根据实际受力特征、试验目的和原则等确定，并且还应包括荷载类型、大小、作用模式和试验次数等。

## 8.5 试验制度

8.5.1 试验开始前应根据试验方案对混凝土结构进行预加载，预加荷载宜采用分级加载且不超过其开裂荷载值的70%（含自重）。

8.5.2 试验开始前宜根据实验方案进行环境和荷载单独作用下的试验设备调试。环境设备调试应按照本标准第4章至第7章中相关的规定进行。荷载设备调试应按照设备操作指南和试验方案确定。

8.5.3 荷载和环境的作用模式应按照下列方式进行：

1 静力荷载和环境应采用同步作用形式，疲劳荷载和环境荷载可采用同步或交替作用形式。

2 静力荷载和环境采用同步作用形式时，静力荷载应一直持续加载且与模拟环境同时进行。

3 疲劳荷载和环境荷载采用同步作用形式时，可根据服役环境中结构服役荷载和环境特征确定加载方式、疲劳荷载与环境荷载频次等。

4 疲劳荷载和环境荷载采用交替作用形式时，可根据服役工况确定疲劳荷载和环境荷载加载次数及交替频率等。若条件不充分，疲劳荷载作用次数可以其预计疲劳寿命的10%或每10万次为一加载时段，环境荷载作用可以模拟环境试验的10次或其整数倍为一加载时段，两者交替进行为一循环周期。

8.5.4 室内模拟环境试验应按下列步骤进行：

1 混凝土结构构件养护结束后，应根据试验要求进行编号、分类和处理等。

2 应根据本标准第8.3节和第8.4节确定的试验参数及制度等开展试验。

3 根据试验要求完成若干次试验后，应及时开展取样和测定性能等工作。

## 8.6 测试内容

8.6.1 本方法的测试内容应包括环境参数、荷载参数和作用效应参数等方面。

8.6.2 环境参数测试应与本标准第4章至第7章中相关的规定测试内容相同。

8.6.3 荷载参数测试包括荷载值、荷载频率、疲劳荷载上下限及其次数等。

8.6.4 作用效应参数测试除应包括本标准第4章至第7章中相关的规定作用效应测试内容外，还宜包含下列内容:

1 静力荷载作用下混凝土结构典型部位混凝土与钢筋材料静态应变、构件变形、挠度、裂缝宽度等静力特性参数。

2 疲劳荷载作用下混凝土结构典型部位混凝土与钢筋的动态应变、结构的动位移、加速度、疲劳荷载S-N曲线等动力及疲劳特性参数。

3 混凝土结构构件的荷载作用效应表征参数测试应按照现行国家标准《混凝土结构试验方法标准》GB/T 50152中相关的规定，每次测试宜在环境条件相同或相近的室温下进行。

## 8.7 测试结果与分析

8.7.1 荷载作用效应对混凝土结构性能影响的测试结果与分析应与本标准第4章至第7章中相关的规定相同。

8.7.2 环境作用效应对混凝土结构极限承载力降低率应按式（8.7.2）计算：

 （8.7.2）

式中：——环境和荷载共同作用时间*t*后的混凝土结构构件极限承载力降低率（%），精确至0.01%；

——初始状况混凝土结构构件极限承载力（kN），精确至0.01kN；

——环境和荷载共同作用*t*时后的混凝土结构构件极限承载力（kN），精确至0.01kN。

8.7.3 环境作用效应对混凝土结构疲劳破坏荷载降低率应按式（8.7.3）计算：

 （8.7.3）

式中：——环境和疲劳荷载共同作用时间*t*后的混凝土结构构件疲劳破坏荷载降低率（%），精确至0.01%；

——初始状况混凝土结构构件疲劳破坏荷载（kN），精确至0.01kN；

——环境和荷载共同作用时间*t*的混凝土结构构件疲劳破坏荷载（kN），精确至0.01 kN。

8.7.4 环境作用效应对混凝土结构变形增加率应按式（8.7.4）计算：

 （8.7.4）

式中：——环境和荷载共同作用时间*t*后的混凝土结构构件变形增加率（%），精确至0.01%；

——初始状况混凝土结构构件的等变形（如静/动挠度、静/动位移或应变等）（mm），精确至0.1mm；

——环境和荷载共同作用时间*t*后的混凝土结构变形（如静/动挠度、静/动位移或应变等）（mm），精确至0.1mm。

8.7.5 环境作用效应对混凝土结构刚度退化率应按式（8.7.5）计算：

 （8.7.5）

式中：——环境和疲劳荷载共同作用时间*t*后的混凝土结构构件截面抗弯刚度退化率（%），精确至0.01%；

——初始状况下混凝土结构构件截面抗弯刚度（kN•m2）；

——环境和疲劳荷载共同作用时间*t*后的混凝土结构构件截面抗弯刚度（kN•m2）。

8.7.6 环境作用效应对混凝土结构疲劳寿命降低率应按式（8.7.6）计算：

 （8.7.6）

式中：——环境和疲劳荷载共同作用时间*t*后的混凝土结构承受疲劳寿命降低率（%），精确至0.01%；

——初始状况下混凝土结构可承受的疲劳次数；

——环境和疲劳荷载共同作用时间*t*后的混凝土结构可承受的疲劳次数。

# 9 自然环境和室内模拟环境中混凝土结构耐久性时间相似关系

## 9.1 一般规定

9.1.1 本方法适用于确定大气环境、氯盐环境、硫酸盐环境和室内模拟环境中混凝土结构耐久性相似率或相似关系。对于冻融环境条件下混凝土结构耐久性相似关系，有经验时可根据服役环境调研结果和室内模拟环境试验的相应关系确定。

9.1.2 若有关次要环境作用因素对混凝土结构耐久性影响的资料充分时，可考虑其对室内模拟环境和自然环境中混凝土结构耐久性相似率或相似关系的修正。

## 9.2 基本要求

9.2.1 应根据本标准第4章至第8章确定的混凝土耐久性测试内容、结果与分析，计算自然环境和室内模拟环境试验中的混凝土结构耐久性时变模型、，所确立的两环境中混凝土结构耐久性退化相似率或相似关系可表示为。具体意义见附表F。

9.2.2 自然环境中混凝土结构耐久性时变模型可通过如下方法确定：

1 现场暴露试验法。将混凝土试件置于自然环境中开展长期暴露试验，通过测定混凝土耐久性指标随时间变化来确定相应的时变模型。应要求暴露混凝土试件的试验环境与混凝土结构的服役环境相同或近似，并且要求试验时间应不少于半年。

2 第三方参照物试验法。以已知服役时间的混凝土结构为参照物（简称第三方参照物），通过确定自然环境和室内模拟环境试验中第三方参照物耐久性时变模型，间接确定两环境中研究对象耐久性时变规律。第三方参照物可采用前期预留、重新制作、抽芯等方式取得。

## 9.3 混凝土结构耐久性时间相似关系

9.3.1 大气环境条件下，自然环境和室内模拟环境中混凝土碳化深度的相似关系应按照如下步骤计算：

1 根据本标准第4.6节和第4.7节确定混凝土碳化测试内容与评价指标，计算室内模拟环境中混凝土碳化深度时变模型:

 （9.3.1-1）

式中：——混凝土碳化*t*（天）后的平均碳化深度（mm）；

——室内模拟环境中混凝土碳化平均深度达到时需要的时间（天）。

2 根据本标准第9.2节确定自然环境中混凝土碳化深度时变模型：

 （9.3.1-2）

式中：——自然环境中混凝土碳化平均深度达到时需要的时间（天）。

3 根据上述自然环境和室内模拟环境中混凝土碳化深度时变模型，计算两环境中混凝土碳化深度相似率或相似关系：

 （9.3.1-3）

式中：——自然环境和室内模拟环境中混凝土碳化平均深度达到时的加速倍数或相似率。

9.3.2 氯盐环境条件下，自然环境和室内模拟环境中混凝土内部氯离子含量变化相似关系应按照如下步骤计算：

1 根据本标准5.6节和第5.7节确定室内模拟环境试验测试内容与评价指标，计算室内模拟环境试验中混凝土内部氯离子含量变化的时变模型：

 （9.3.2-1）

式中：——室内模拟环境*n*次试验循环后的混凝土内部深度*x*处的氯离子含量（%）；

——室内模拟环境中*n*次试验循环对应的时间（天）。

2 根据9.2确定自然环境中混凝土结构服役时间，计算自然环境中混凝土内部氯离子含量变化的时变模型：

 （9.3.2-2）

式中：——自然环境中混凝土内部深度*x*处的氯离子含量达到对应的时间（天）。

3 根据上述确定的混凝土结构性能退化时变模型，计算自然环境和室内模拟环境试验中混凝土试件极限承载力降低率相似率或相似关系：

 （9.3.2-3）

式中：——自然环境和室内模拟环境中混凝土内部深度*x*处的氯离子含量达到时对应的加速倍数或相似率。

9.3.3 硫酸盐环境条件下，自然环境和室内模拟环境中混凝土内硫酸盐含量变化率相似关系应按照如下步骤计算：

1 根据本标准第6.6节和第6.7节确定室内模拟环境试验测试内容与评价指标，计算室内模拟环境试验中混凝土内硫酸盐含量变化率时变模型：

 （9.3.3-1）

式中：——*n*次试验循环后的混凝土试件深度为*x*处的硫酸盐含量变化率（%）；

——室内模拟环境中*n*次试验循环对应的时间（天）。

2 根据本标准第9.2节确定自然环境中混凝土结构服役时间，计算自然环境中混凝土内硫酸盐含量变化率时变模型：

 （9.3.3-2）

式中：——自然环境中混凝土内硫酸盐含量变化率达到对应的时间（天）。

3 根据上述确定的混凝土结构性能退化时变模型，计算自然环境与室内模拟环境试验中混凝土内硫酸盐含量变化率相似率或相似关系：

 （9.3.3-3）

式中：——自然环境和室内模拟环境中混凝土内硫酸盐含量变化率对应的加速倍数或相似率。

9.3.4 硫酸盐环境条件下，自然环境和室内模拟环境中混凝土试件截面剥蚀深度相似关系应按照如下步骤计算：

1 根据本标准第6.6节和第6.7节确定室内模拟环境试验测试内容与评价指标，计算室内模拟环境试验中混凝土试件截面剥蚀深度时变模型：

 （9.3.4-1）

式中：为*n*次试验循环后的混凝土试件平均剥蚀深度（mm）；

——室内模拟环境中*n*次试验循环对应的时间（天）。

2 根据本标准第9.2节确定自然环境中混凝土结构服役时间，计算自然环境中混凝土试件截面剥蚀深度时变模型：

 （9.3.4-2）

式中：——自然环境中混凝土试件膨胀率达到对应的时间（天）。

3 根据上述确定的混凝土结构性能退化时变模型，计算自然环境与室内模拟环境试验中混凝土试件截面剥蚀深度相似率或相似关系：

 （9.3.4-3）

式中：——自然环境和室内模拟环境中混凝土试件截面剥蚀深度对应的加速倍数或相似率。

9.3.5 环境与荷载共同作用下，自然环境和室内模拟环境中混凝土结构构件极限承载力降低率相似关系应按照如下步骤计算：

1 根据本标准第8.6节和第8.7节确定室内模拟环境试验测试内容与评价指标，计算室内模拟环境试验中混凝土结构构件极限承载力降低率时变模型：

 （9.3.5-1）

式中：——环境和荷载共同作用下*t*时的混凝土结构构件极限承载力降低率（%）；

——室内模拟环境中*n*次试验循环对应的时间（天）。

2 根据本标准第9.2节确定自然环境中混凝土结构服役时间，计算自然环境中混凝土结构构件极限承载力降低率时变模型：

 （9.3.5-2）

式中：——自然环境中混凝土试件极限承载力降低率达到对应的时间（天）。

3 根据上述确定的混凝土结构性能退化时变模型，计算自然环境与室内模拟环境试验中混凝土结构构件极限承载力降低率相似率或相似关系：

 （9.3.5-3）

式中：——自然环境和室内模拟环境中混凝土结构构件极限承载力降低率对应的加速倍数或相似率。

9.3.6 环境与荷载共同作用下，自然环境和室内模拟环境中混凝土结构构件变形增加率相似关系应按照如下步骤计算：

1 根据本标准第8.6节和第8.7节确定室内模拟环境试验测试内容与评价指标，计算室内模拟环境试验中混凝土结构构件变形增加率时变模型：

 （9.3.6-1）

式中：——环境和荷载共同作用*t*后的混凝土结构构件变形增加率（%）；

——室内模拟环境中试验时间（天）。

2 根据本标准第9.2节确定自然环境中混凝土结构服役时间，计算自然环境中混凝土结构构件变形增加率时变模型：

 （9.3.6-2）

式中：——自然环境中混凝土结构构件变形增加率达到对应的时间（天）。

3 根据上述确定的混凝土结构性能退化时变模型，计算自然环境与室内模拟环境试验中混凝土结构构件变形增加率相似率或相似关系：

 （9.3.6-3）

式中：——自然环境和室内模拟环境中混凝土结构构件变形增加率对应的加速倍数或相似率。

# 附表A 检验项目

A.0.1 检验项目

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 章节 | 极限状态 | 检测项目 |
| 4 大气环境条件下混凝土结构耐久性室内模拟环境试验方法 | 混凝土保护层锈胀开裂极限状态 | 混凝土保护层锈胀裂缝限值宽度耐久年限 |
| 钢筋开始锈蚀极限状态 | 钢筋开始锈蚀耐久年限 |
| 混凝土保护层锈胀裂缝宽度极限状态 | 混凝土保护层锈胀开裂耐久年限 |
| 5 氯盐环境条件下混凝土结构耐久性室内模拟环境试验方法 | 钢筋开始锈蚀极限状态 | 钢筋开始锈蚀耐久年限 |
| 混凝土保护层锈胀开裂极限状态 | 混凝土保护层锈胀开裂耐久年限 |
| 6 硫酸盐环境条件下混凝土结构耐久性室内模拟环境试验方法 | 混凝土构件腐蚀损伤极限状态 | 混凝土损伤深度 |
| 7 冻融环境条件下混凝土结构耐久性室内模拟环境试验方法 | 混凝土构件表面剥落极限状态 | 混凝土表面剥落率 |
| 平均剥落深度 |
| 钢筋锈蚀极限状态 | 钢筋锈蚀 |
| 8 环境与荷载共同作用下混凝土结构耐久性室内模拟环境试验方法 | 承载力极限状态 | 混凝土构件承载力 |
| 疲劳寿命 |
| 正常使用极限状态 | 混凝土构件变形、裂缝 |

# 

# 附表B 大气环境试验的检测内容

B.0.1 试验检测内容记录表

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 项目 | 混凝土抗压强度/MPa | 尺寸/mm | 温度/℃ | 相对湿度/% | 二氧化碳浓度/% | 碳化深度/mm | 试验现象（表面特征、外部形貌等） |
|
| 1 |  |  |  |  |  |  |  |
| 2 |  |  |  |  |  |  |  |
| 3 |  |  |  |  |  |  |  |
| … |  |  |  |  |  |  |  |
| 结论 |  |  |  |  |  |  |  |

试验名称 日期 标号

负责 校核 记录 试验单位（公章） 日期

# 附表C 氯盐环境试验的检测内容

C.0.1试验检测内容记录表

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 项目 | 混凝土抗压强度/MPa | 尺寸/mm | 模拟试验方式 | 温度/℃ | 相对湿度/% | 溶液浓度/% | 喷淋时间/h | 干燥时间/h | 喷雾时间/h | 循环风速/(m/s) | 喷淋量/[ml/(80cm2˙h)] | 喷雾量/[ml/(80cm2˙h)] | 间歇时间/h | 试验周期/h | 试验现象（表面特征、外部形貌、开裂等） |
| 1 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 2 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 3 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| … |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 结论 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

试验名称 日期 标号

负责 校核 记录 试验单位（公章） 日期

# 附表D 硫酸盐环境试验的检测内容

D.0.1 试验检测内容记录表

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 项目 | 混凝土抗压强度/MPa | 尺寸/mm | 模拟试验方式 | 硫酸盐种类 | 温度/℃ | 相对湿度/% | 溶液浓度/% | 喷淋时间/h | 干燥时间/h | 循环风速/(m/s) | 喷淋量/[ml/(80cm2˙h)] | pH值 | 试验周期/h | 试验现象（表面特征、外部形貌等） |
| 1 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 2 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 3 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| … |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 结论 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

试验名称 日期 标号

负责 校核 记录 试验单位（公章） 日期

# 附表E 冻融环境试验的检测内容

E.0.1试验检测内容记录表

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 项目 | 混凝土抗压强度/MPa | 尺寸/mm | 模拟试验方式 | 冻结温度/℃ | 融化温度/℃ | 冻结时间/h | 融化时间/h | 相对湿度/% | 溶液浓度/% | 重量/g | 喷淋量/[ml/(80cm2˙h)] | 试件侵蚀面积/cm2 | 试验现象（表面特征、外部形貌等） | 声时/μs |
| 1 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 2 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 3 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| … |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 结论 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

试验名称 日期 标号

负责 校核 记录 试验单位（公章） 日期

# 附表F 评价指标说明

F.0.1 评价指标意义及说明

|  |  |
| --- | --- |
| 章节 | *X*表征的参数及意义 |
| 第4章 大气环境条件下混凝土结构耐久性室内模拟环境试验方法 | 混凝土平均碳化深度 |
| 第5章 氯盐环境条件下混凝土结构耐久性室内模拟环境试验方法 | 氯离子扩散系数*D* |
| 混凝土表面氯离子浓度*Cs* |
| 混凝土内深度x处氯离子含量 |
| 混凝土内钢筋锈蚀电流密度增加率 |
| 混凝土内钢筋脱钝时间*t* |
| 混凝土内钢筋质量损失率 |
| 第6章 冻融环境条件下混凝土结构耐久性室内模拟环境试验方法 | 混凝土试件的超声波相对动弹性模量*Pi* |
| 混凝土试件表面单位面积剥落量 |
| 混凝土试件质量损失率 |
| 第7章 硫酸盐环境条件下混凝土结构耐久性室内模拟环境试验方法 | 混凝土试件重量损失率 |
| 混凝土抗压强度耐蚀系数 |
| 混凝土试件膨胀率 |
| 混凝土试件截面剥蚀深度 |
| 混凝土内硫酸盐含量变化率 |
| 混凝土试件极限承载力降低率 |
| 第8章 环境与荷载共同作用下混凝土结构耐久性室内模拟环境试验方法 | 混凝土试件极限承载力降低率 |
| 混凝土结构构件疲劳破坏荷载降低率 |
| 混凝土结构构件变形增加率 |
| 混凝土结构构件刚度退化率 |
| 混凝土结构构件疲劳寿命降低率 |

# 本标准用词与用语说明

1 为便于在执行本标准条文时区别对待 对于要求严格程度不同的用词说明如下：

1）表示很严格，非这样不可的用词：

正面词采用：“必须”；反面词采用：“严禁”。

2）表示严格，在正常情况下均这样做的用词：

正面词采用：“应”；反面词采用：“不应”或“不得”。

3）表示容许稍有选择，在条件许可时，首先应这样做的用词：

正面词采用：“宜”；反面词采用：“不宜”。

4）表示有选择，在一定条件下可以这样做的用词：

正面词采用：“可”；反面词采用：“不可”。

2 条文中指定按其它有关标准执行的写法为：“应按…执行”或“应符合…的规定”或“应按照…的规定”。

# 引用标准名录

本标准参考的相关标准、规范、规程和指南等如下：

《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》GB/T 50080

《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082-2009

《混凝土结构设计规范》GB 50010-2010

《混凝土质量控制标准》GB 50164-2011

《混凝土结构工程施工规范》GB 50666-2011

《混凝土结构耐久性设计规范》GB/T 50476-2008

《混凝土结构试验方法标准》GB/T 50152-2012

《人造气氛腐蚀试验盐雾试验》GB/T10125-2012

《粉煤灰混凝土应用技术规范》GB/T 50146-2014

《人造气氛腐蚀试验-盐雾试验》GB/T 10125-2012

《铁路混凝土结构耐久性设计规范》TB 10005—2010

《水工混凝土耐久性技术规范》DL/T 5241-2010

《混凝土碳化试验箱》JG/T 247-2009

《水工混凝土试验规程》DL/T 5150-2006

《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》JTG E30-2017

《水工混凝土试验规程》SL 352-2006

《混凝土结构耐久性设计与施工指南》CCES 01-2004

《水运工程混凝土试验规程》JTJ 270-1998

《季节性冻土地区公路设计与施工技术规范》JTG/T D31-06-2017

附：条文说明

中国工程建设标准化协会

**混凝土结构耐久性室内模拟环境试验方法标准**

Standard for Indoor Simulated Environmental Test Method of

Concrete Structure Durability

**CECS XX**

**条文说明**

主编部门：

批准部门：

施行日期：

**XX出版社**

**2018 XX**

**编制说明**

根据中国工程建设标准化协会[2016]建标协字038号文《关于印发<2016 年第一批工程建设协会标准制订、修订计划>的通知》的要求，由中南大学会同有关高校及科研院所筹建了标准编制组，共同编制《混凝土结构耐久性室内模拟环境试验方法标准》。

混凝土结构耐久性问题是土木工程领域研究难点和焦点。国内外关于混凝土结构耐久性已展开大量研究工作，但多数采用加速试验法进行试验。目前，有关混凝土结构耐久性室内模拟环境试验方面几乎还处于初期探索阶段。自然环境与室内模拟环境试验间的相似关系模糊，尚无相应的操作规范出台。国内已有数十家科研单位安装了混凝土结构耐久性的室内模拟环境试验系统，有必要提出合理的混凝土结构耐久性室内模拟环境试验方法。本标准是在总结国内外研究成果，充分吸收我国近年来的研究成果并借鉴现行相关国内外标准基础上编制完成的。

混凝土结构的劣化机理非常复杂、影响因素众多，存在较强的随机性和不确定性。此外，各地环境因素、服役工况和混凝土结构材性也存在很大差异。因此，在应用本标准时，应充分考虑混凝土结构服役环境实际情况和混凝土结构特性。

为便于广大设计、施工、检测、鉴定、科研、高校等单位有关人员在使用本标准时能正确理解和执行条文规定，标准编制组按章、节、条顺序编制了本标准的条文说明，供使用者参考。

目 次

[1 总则 54](#_Toc520469817)

[2 术语和符号 56](#_Toc520469818)

[2.1 术语 56](#_Toc520469819)

[2.2 符号 56](#_Toc520469820)

[3 基本规定 57](#_Toc520469821)

[3.1 一般规定 57](#_Toc520469822)

[3.2 试件制作及养护 58](#_Toc520469823)

[3.3 基本要求 58](#_Toc520469824)

[4 大气环境中混凝土结构耐久性室内模拟环境试验方法 60](#_Toc520469825)

[4.1 一般规定 60](#_Toc520469826)

[4.2 试件要求 60](#_Toc520469827)

[4.3 试验设备 60](#_Toc520469828)

[4.4 试验参数 61](#_Toc520469829)

[4.5 试验制度 61](#_Toc520469830)

[5 氯盐环境中混凝土结构耐久性室内模拟环境试验方法 62](#_Toc520469831)

[5.1 一般规定 62](#_Toc520469832)

[5.2 试件要求 62](#_Toc520469833)

[5.3 试验设备 62](#_Toc520469834)

[5.4 试验参数 63](#_Toc520469835)

[5.5 试验制度 65](#_Toc520469836)

[5.6 测试内容 65](#_Toc520469837)

[5.7 测试结果与分析 66](#_Toc520469838)

[6 硫酸盐环境中混凝土结构耐久性室内模拟环境试验方法 68](#_Toc520469839)

[6.1 一般规定 68](#_Toc520469840)

[6.2 试件要求 69](#_Toc520469841)

[6.3 试验设备 70](#_Toc520469842)

[6.4 试验参数 71](#_Toc520469843)

[6.5 试验制度 74](#_Toc520469844)

[6.6 测试内容 75](#_Toc520469845)

[6.7 测试结果与分析 75](#_Toc520469846)

[7 冻融环境中混凝土结构耐久性室内模拟环境试验方法 76](#_Toc520469847)

[7.1 一般规定 76](#_Toc520469848)

[7.2 试件要求 76](#_Toc520469849)

[7.3 试验设备 76](#_Toc520469850)

[7.4 试验参数 77](#_Toc520469851)

[7.5 试验制度 77](#_Toc520469852)

[7.6 测试内容 78](#_Toc520469853)

[8 环境与荷载共同作用下混凝土结构耐久性室内模拟环境试验方法 79](#_Toc520469854)

[8.2 试件要求 79](#_Toc520469855)

[8.3 试验设备 79](#_Toc520469856)

[8.5 试验制度 79](#_Toc520469857)

[9 自然环境和室内模拟环境中混凝土结构耐久性时间相似关系 81](#_Toc520469858)

[9.1 一般规定 81](#_Toc520469859)

[9.2 基本要求 82](#_Toc520469860)

[9.3 混凝土结构耐久性时间相似关系 82](#_Toc520469861)

1 总则

1.0.1 如何准确地预测新建和既有混凝土结构使用寿命，是当今土木工程领域研究的难点。环境中侵蚀介质种类和浓度、环境类型、传输方式等直接影响着混凝土结构耐久性退化速率和劣化程度。已有研究表明混凝土内部微环境和自然环境之间存在显著差异，但现有研究方法多将外部环境直接视为为混凝土内部微环境。采用加速试验法是通过提高温度、湿度、侵蚀介质浓度或引入现场不具备的因素（电流等）达到加速混凝土结构耐久性劣化，从而导致了混凝土结构耐久性侵蚀机理、过程和结果与实际状况不符，研究成果难以准确地评估混凝土结构耐久性和预测使用寿命。因此，亟需针对混凝土结构自然环境特征提出一种快速的混凝土结构耐久性试验方法。该试验法应兼备真实试验法和加速试验法的优点，并具有结果真实、可靠、快速、模拟性好、重现性和相关性强等特征。通过室内模拟环境试验，确立自然环境与室内模拟环境试验中混凝土结构耐久性退化的“相似率”，即解决混凝土结构同等劣化程度下室内模拟环境试验中一年相当于自然环境中的多少年问题。因此，拟基于混凝土内部微环境，提出混凝土结构耐久性室内模拟环境试验方法，为混凝土结构服役寿命预测和可靠性判定提供重要支撑。

国内外关于混凝土结构耐久性已展开大量研究工作，但多数采用加速试验法进行试验。目前，有关混凝土结构耐久性室内模拟环境试验方面几乎还处于初期探索阶段。自然环境与室内模拟环境试验间的相似关系模糊，未建立明确的相似准则，尚无相应的参数规定与操作规范出台。国内外关于模拟试验制度取值依据尚未达成共识，现有试验参数选取与操作方法不一。因室内模拟环境试验的优点突出和意义重大，国内已有三十余所科研单位安装了混凝土结构耐久性的室内模拟环境试验系统，如中南大学、浙江大学、中国铁道科学研究院、广西大学、长沙理工大学、国防科技大学、深圳大学、中南林业科技大学、湖南科技大学等。然而，因研究思路和出发点不同，混凝土结构耐久性室内模拟环境试验制度、参数筛选、参数取值依据和范围（如温度、湿度、溶液浓度、试验循环周期、风速等）等分歧较大，研究结果的有效性、可比性较差。因此，有必要提出一套合理的混凝土结构耐久性室内模拟环境试验方法。

1.0.2 影响混凝土耐久性的因素主要有混凝土碳化、碱骨料反应、温湿度变化、硫酸盐侵蚀、冻融循环和盐类结晶等，国内外关于混凝土耐久性研究较多且成果丰硕。本标准主要是针对当前最常见的大气、氯盐、硫酸盐、冻融环境作用下以及其与荷载共同作用下的混凝土结构，开展混凝土结构耐久性室内模拟环境试验。鉴于当前研究对其它复杂环境类型下混凝土结构耐久性试验方法（如碱骨料反应等）尚不完善，故暂时不涉及，部分试验方法也将在后续修订过程中进行补充。本标准是对现有混凝土结构耐久性试验方法的改进、完善和提升。若无特殊说明，所述均为标准大气压下的研究工作。

1.0.3 本标准涉及现行有关标准及规范较多，有关部门已制定的混凝土结构耐久性标准是本标准制订的基础。目前，相关规范中部分也涉及了混凝土耐久性试验方法等内容。因此，对混凝土结构耐久性开展室内模拟环境试验时除应符合本标准外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术语和符号

## 2.1 术语

2.1.1 为《混凝土结构耐久性设计规范》GB/T 50476-2008中的定义。

2.1.3 为《混凝土结构耐久性设计规范》GB/T 50476-2008中的定义。

2.1.8 为《混凝土结构耐久性设计规范》GB/T 50476-2008中的定义。

2.1.1至2.1.8本标准采用的术语及其含义确定原则是按照现行工程建设国家标准规定的均采用相应标准引用，尚未规定的应参照国家标准《工程结构设计基本术语标准》（GB/T 50083-2014）给出定义和说明。

## 2.2 符号

2.2 本标准涉及的符号若为其它工程建设标准的符号，宜采用原有符号；仅在本标准应用的符号应由本标准给出，条文中仅出现一次的符号原则上在条文中说明。参照《工程结构设计通用符号标准》（GB/T 50132-2014）给出定义和说明。

3 基本规定

## 3.1 一般规定

3.1.2 现有混凝土模拟试验参数多基于经验获得，缺少试验参数取值依据、基准和范围，各家试验参数的取值不同，从而导致研究成果难以对比。同时，不同服役地域的混凝土结构耐久性劣化规律和特征不同，使得研究成果和试验方法的可比性与适用性差。自然环境中的各种因素可视为激励或作用，服役于服役环境中的混凝土结构会产生相应的响应。如果能使室内模拟环境与自然现场中的混凝土内一定局域范围（或保护层）产生相同或相似的响应，则自然环境和室内模拟环境试验之间就存在一一对应的关系。因此，本标准思路是基于室内模拟环境试验与自然环境中混凝土保护层范围内部微环境等效的原则制订试验制度，进而建立自然环境与室内模拟环境试验中混凝土结构耐久性相似关系。混凝土结构耐久性问题主要是混凝土保护层劣化和钢筋锈蚀，并且通常混凝土保护层厚度不大于50mm。因此，在条件不充分或资料不足情况下，可采用混凝土表层50mm为基准开展混凝土结构耐久性试验研究。

3.1.3 影响混凝土结构耐久性的因素较多，如温度、相对湿度、降水量、蒸发量、光照、风速、荷载、冻融、侵蚀介质种类及浓度等。现场混凝土结构的耐久性劣化是在上述某一种或多种因素共同作用下的退化，但上述因素具有显著的随机性和不确定性。室内模拟环境试验只能设定确定的试验参数值，并且是通过控制试验参数值及其持续时间来进行模拟试验。为了简化试验难度、试验制度和操作步骤，应在保证混凝土耐久性退化过程和规律相同的前提下设定尽可能少的试验参数。因此，需要对影响混凝土结构耐久性的因素进行分类、归一。考虑到部分次要环境作用因素的作用效果与主要环境作用因素相同或相似，故将其对混凝土耐久性的作用并入主要环境作用因素，即采用修正因子（或修正系数）形式修正主要环境作用因素数值，并以此数值作为室内模拟环境试验控制参数。对于难以归一转化并入主要环境作用因素的次要环境作用因素，则通过修正因子（或修正系数）修正最后的混凝土结构耐久性试验结果，即利用修正因子（或修正系数）修正修正混凝土结构耐久性相似关系。

3.1.4 考虑到混凝土结构服役环境实际情况复杂，故要求对其服役环境和受力特性等进行调研。同时，根据环境特征确定试验参数：首先，应根据自然环境确定全年每月平均温度、相对湿度、侵蚀介质种类与浓度等，将月均温度值相近月份归类且划分为不同温度段并求各段均值，还应计算年均相对湿度和侵蚀介质浓度。然后，应根据侵蚀介质的扩散或化学反应系数与温度、相对湿度、浓度间的关系，计算出室内模拟环境试验中温度、相对湿度和浓度等单一参数的加速倍率。最后，通过修正因子（或修正系数）来考虑次要环境作用因素对混凝土结构耐久性的影响。

## 3.2 试件制作及养护

3.2. 试样制作、养护应符合现行国家标准《普通混凝土力学性能试验方法标准》GB/T 50081-2002中的规定。构造措施和裂缝控制应符合现行行业标准《混凝土结构耐久性设计与施工指南》CCES 01-2004中相关的规定。有关混凝土养护龄期要求参照了现行国家标准《粉煤灰混凝土应用技术规范》GB/T 50146-2014中相关的规定。为了保证混凝土结构构件与正常服役状况下具有相同的性能特征，故考虑了现场实际情况下的试件制作和养护等。

3.2.3 为了保证混凝土结构构件与正常服役状况下具有相同的性能特征，故对试件的材料组成、构造要求等做了规定。钢筋和混凝土材料应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010-2010。

## 3.3 基本要求

3.3.1 混凝土材料参照了《混凝土结构耐久性设计规范》GB/T 50476-2008中的规定，混凝土取样参照了现行国家标准《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》GB/T 50080-2016中相关的规定。

3.3.2 混凝土结构主要包括素混凝土、钢筋混凝土和预应力混凝土结构几类，考虑到试验对象的普遍性，故本标准涉及了素混凝土、钢筋混凝土、预应力混凝土结构。

3.3.4 鉴于现有的室内模拟环境实验系统具有多功能性、通用性，故本标准对相应的室内模拟环境实验系统构成等提出了要求。

3.3.5 考虑到混凝土结构可能承受荷载为静载荷或动荷载，故对荷载模拟试验装置提供的荷载类型提出要求。

3.3.7 因室内模拟环境试验采用的模拟试验条件恶劣，故对环境模拟室选材及性能提出耐腐蚀等要求。同时，要求材性对试验结果无影响。

3.3.8 考虑到试验过程中操作空间、试件尺寸、喷淋量均匀性、循环风速等影响，故对环境模拟室尺寸大小提出要求。鉴于水泥水化产物AFt理论分解温度约为60℃，自然服役服役环境中温度一般不会超过该值。为了保证侵蚀机理、过程和结果的一致，并考虑了设备的温度滞后、缓冲等效应，故限定了模拟环境温度上限。至于温度下限值为-20℃是考虑了我国北部地区冬季常面临的实际温度及其混凝土内孔隙水冰点临界值范围，为开展冻融循环试验设定温度参数范围设定范围。

相对湿度可影响混凝土孔隙内含水率（饱和度），进而影响混凝土内孔隙硫酸盐溶液浓度、盐结晶-溶解、生成物种类等。考虑到我国大部分地区气候特征和现有试验方法及其设备除湿度能力，故干燥过程采用50%相对湿度进行。室内模拟环境试验喷淋过程中，溶液直接通过喷头喷洒于混凝土试样表面，考虑到试验的可操作性和简易性，故喷淋润湿过程中相对湿度设定为100%。考虑到试验箱内相对湿度不均匀性和传感器的灵敏度等，故借鉴GB/T 50082-2009中相关的规定，确定了相对湿度控制精度5%。

实验室内温湿度传感器是由各个测定实时测试后换算确定的，为了保证试验工况条件合理，故对模拟环境室内的实时温度、湿度等测试频率提出要求。同时，考虑到试验过程中的停止、突发事件（如停电、过载等），故对设备的记忆存储等提出了要求。

3.3.7 考虑到试验设备运行过程中存在的安全问题，针对设备的安全使用、操作员的人身安全和防止可能的事故产生，设备必须在室体、电气系统、制冷系统等诸方面设置安全保护措施，故对相应的系统设备的安全保障措施提出要求。

4 大气环境中混凝土结构耐久性室内模拟环境试验方法

## 4.1 一般规定

4.1.1 当混凝土结构同时受到碳化和其它环境因素共同作用时，若混凝土结构劣化由碳化为主导，可采用本方法开展混凝土碳化试验。否则，宜参考本方法及现行国家标准《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082-2009开展研究。

4.1.2 区分了影响混凝土结构碳化的环境参数中的主要和次要环境作用因素。主要环境作用因素可为确立室内模拟环境试验控制参数提供依据，次要环境作用因素可用于修正混凝土结构耐久性试验结果。鉴于当前研究主要是聚焦在主要环境作用因素用于确定试验制度及参数方面，有关次要环境作用因素对试验结果修正方面的探讨将在后续研究工作中开展。相应的次要环境作用因素修正因子取值范围等也将在后续标准修订中补充完善。

## 4.2 试件要求

4.2.1 宜采用棱柱体混凝土试件，应以3块为一组，棱柱体长宽比不宜小于3。若无棱柱体混凝土试件时，可采用立方体混凝土试件，但应增加试件数量。试件的最小横截面尺寸和公差宜符合现行国家标准《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082-2009中相关的规定，见表4.2.1。试件所用材料应同时满足混凝土最低强度等级、最大水胶比和材料组成的要求。

表4.2.1 试件的最小横截面尺寸

|  |  |
| --- | --- |
| 骨料最大公称粒径（mm） | 试件最小横截面尺寸（mm） |
| 31.5 | 100×100或100 |
| 40.0 | 150×150或150 |
| 63.0 | 200×200或200 |

4.2.2 考虑了配筋混凝土试件因混凝土碳化及钢筋锈蚀等面临耐久性问题，故也对配筋混凝土构件尺寸比例提出要求。

## 4.3 试验设备

4.3.1 混凝土碳化试验箱的各项参数设置应符合现行国家标准《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082和行业标准《混凝土碳化试验箱》JG/T 247-2009中相关的规定。

## 4.4 试验参数

4.4.1 混凝土室内模拟试验中的环境参数（如温度、相对湿度和二氧化碳浓度等）和加速倍数确定原则，应是在保证自然环境和室内模拟环境试验中的混凝土碳化机理相同前提下，最大限度的提高混凝土碳化速率。

4.4.3 现行国家标准《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082-2009中采用二氧化碳浓度为（20±3）%，法国标准XP P18-458中规定快速碳化试验二氧化碳浓度为（50±5）%，欧洲DuraCrete在《Compliance Testing for Probabilistic Design Purposes》报告中给出快速碳化试验二氧化碳浓度是2%，Nordtest method NT Build 357中二氧化碳浓度采用3%，葡萄牙规范LNEC E391中二氧化碳浓度采用5%。国内外现有研究中，快速碳化试验二氧化碳浓度取值主要为1%、2%、2.5%、3%、3.5%、4%、5%、10%、20%、40%、45%、50%、100%等，而西方国家研究中二氧化碳浓度多不超过10%。国内外许多学者研究了不同二氧化碳浓度对混凝土碳化影响，研究结果认为二氧化碳浓度较高时的混凝土碳化机理与自然情况不同。二氧化碳浓度较低时的混凝土碳化深度增长较快，二氧化碳浓度过大时混凝土碳化反应将不再由气体扩散主导。此外，二氧化碳浓度较高时，混凝土中碳酸钙反应生成速率较大，生成物覆盖于氢氧化钙表面会阻碍了反应进行。Miguel Angel Sanjuan研究了二氧化碳浓度为5%、20%、100%的砂浆碳化，认为采用高浓度的二氧化碳（100%）进行快速碳化试验存在显著的不足。Hongzhi Cui研究了不同二氧化碳浓度（2%、10%、20%、50%和100%），发现二氧化碳浓度小于20%的混凝土碳化深度增加较快。但二氧化碳浓度为50%和100%时，混凝土碳化深度增长缓慢。Marta Castellote对水泥净浆进行碳化试验（二氧化碳浓度为0.03%、3%、10%、100%），发现水泥浆在二氧化碳浓度为3%的条件碳化后，孔结构与自然碳化更相近。Knofel认为快速碳化试验中二氧化碳的浓度上限范围在1%~3%。综上所述，本方法中选取了二氧化碳浓度为3%。

## 4.5 试验制度

4.5.5 现行国家标准《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082-2009中采用试验龄期为3天、7天、14天、28天。混凝土在二氧化碳浓度20%时碳化28天的碳化效果可与自然条件下碳化50年效果相当。碳化试验采用二氧化碳浓度为3%时，碳化28天相当于自然碳化7年效果。为获取更多测试点，故碳化龄期设定至56天，其效果可与自然碳化15年的碳化结果相当。

# 5 氯盐环境中混凝土结构耐久性室内模拟环境试验方法

## 5.1 一般规定

5.1.1 当混凝土结构同时受到氯盐侵蚀和其它环境因素共同作用时，若混凝土结构劣化由氯盐侵蚀主导，可采用本方法开展试验。

5.1.2 环境分类参照《混凝土结构耐久性设计规范》GB/T 50476-2008中第6章氯化物环境。近海或海洋环境中的水下区、潮汐区、浪溅区和大气区的划分，应按国家现行标准《海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范》JTJ 275-2000的规定确定。除冰盐环境可参照海洋浪溅区进行。

5.1.3 由于一般情况下试验时间有限，为模拟长时间作用下氯盐对混凝土结构的侵蚀，需要提高氯盐侵蚀速度。试验研究发现：提高混凝土表面氯离子浓度或使表面氯离子浓度较快达到稳定值，均可加速氯离子侵蚀。因此，可通过适当提高氯盐溶液浓度来加速混凝土氯盐侵蚀。温度可影响混凝土中自由氯离子的活化能和扩散能力，故提高温度能够提高氯离子扩散系数，达到加速侵蚀效果。区分混凝土氯盐侵蚀的主要和次要环境作用因素目的是：主要环境作用因素可为确立室内模拟环境试验控制参数提供依据，次要环境作用因素可用于修正混凝土结构耐久性试验结果。鉴于当前研究主要是聚焦在主要环境作用因素用于确定试验制度及参数方面，有关次要环境作用因素对试验结果修正方面的探讨将在后续研究工作中开展。相应的次要环境作用因素修正因子取值范围等也将在后续标准修订中补充完善。

## 5.2 试件要求

5.2.2 试件尺寸及钢筋选择均参考现行国家标准《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082-2009中对混凝土中钢筋锈蚀试验的规定。考虑到现有工程中一般采用高等级、高质量的钢筋，故仅规定钢筋质量最差情况。

## 5.3 试验设备

5.3.1 盐雾试验箱的各项参数设置应符合现行标准《盐雾试验箱技术条件》GB/T 10587-2006的规定。

5.3.2 对于全浸泡侵蚀是通过调整溶液浓度和温度加上侵蚀过程，故应在环境模拟室内设置一个溶液箱以便于保持试件浸泡。

5.3.4 为了保证试件表面润湿过程中、盐溶液浓度均匀，故对喷淋量和喷雾沉降量提出要求。

5.3.6 对于混凝土中氯离子含量《混凝土质量控制标准》GB 50164-2011中和《水运工程混凝土试验规程》JTJ 270-1998提供了相应的测定方法。

## 5.4 试验参数

5.4.1 模拟水下区域的构件侵蚀时，因构件长期浸没于含氯盐溶液中（海水、地下水等），故试验过程中将试件浸泡于氯盐溶液即可。干湿交替情况下构件的模拟侵蚀试验，可将试件采用浸泡和风干按一定时间比例交替循环。液体溅射的情况下构件模拟侵蚀试验，一般将试件采用浸泡和风干按一定时间比例交替循环。大气环境中构件模拟侵蚀试验，应控制盐雾中氯离子含量和盐雾沉降量、温湿度和干湿循环比例。

5.4.2 根据大洋海水（全世界77个海水样品）盐含量调查得知，每公斤海水中盐含量约为34.477g，其中氯离子含量为19.103g。因此，氯离子在盐含量占比为0.554。我国四大海域的盐度在30~35之间，由于海水组成恒定性，可推算我国海水中的氯离子含量在16.62~19.39之间。已有试验研究表明提高氯离子浓度可加速混凝土氯盐侵蚀。当混凝土表面氯离子浓度提高2倍时加速侵蚀效果较好，且能把侵蚀时间缩短0.3～0.5倍。同时，由于在人工模拟试验中采用NaCl溶液代替海水溶液，需要保证两种溶液的氯离子浓度相同。因此，在计算NaCl溶液的浓度时，需要换算NaCl的摩尔质量：。计算可得NaCl溶液浓度在5%~6.5%之间。根据现行规范《人造气氛腐蚀试验盐雾试验》GB/T 10125-2012，并参考现有研究成果，认为选取NaCl溶液浓度5%既可保证氯盐侵蚀机理相同，又可与现有研究成果进行对比。

5.4.3 表5.4.3中自然温度是指室内试验需模拟的自然环境平均气温，可根据需要选取季或年平均温度，并按照表格选取相应的试验温度。当表5.4.3中无相应的数据点时，可采用Nernst-Einstein方程计算相应的试验温度。Nernst-Einstein方程给出了混凝土氯离子扩散系数与温度之间的关系：

 （5.4.3-1）

式中：*DT*、*D0*分别为温度*T*和*T0*时的氯离子扩散系数。*q*为氯离子活化系数，与水灰比有关：当w/c=0.4时，*q* =6000K；当w/c=0.5时，*q* =5450K；当w/c=0.6时，*q*=3850K。

因此，自然和室内加速温度下混凝土内氯离子扩散系数之间的关系如下：

 （5.4.3-2）

式中：T0为自然条件下环境温度的绝对温度，D0为自然条件下的混凝土内氯离子的扩散系数，为加速条件下氯离子扩散系数提高倍数，T为室内条件下气温的绝对温度值。当已知*T*0、和*q*时，可根据上式计算出室内加速条件下对应的温度。研究表明，过高的温度会导致水泥水化产物（AFt等）分解或晶型转变，并且维持较高的室内加速试验温度对设备要求苛刻。因此，设计室内模拟环境试验时设定的混凝土内氯离子扩散系数加速倍数不宜过高。现有研究表明温度对混凝土内氯离子扩散系数加速倍数为4时，相应的侵蚀机理及其结果相关性较好。因此，对相应的试验温度进行计算，所求解出相应的室内加速试验温度值如表5.4.3。此外，研究者也可根据研究对象、服役环境工况、试验周期和加速倍数等，利用Nernst-Einstein方程计算出相应的试验温度。

5.4.4 模拟在水下区构件侵蚀时，因混凝土内氯离子传输主要依靠扩散方式，故可通过提高氯离子浓度和温度来加速混凝土氯盐侵蚀效果。

5.4.5 全浸泡和浸泡式干湿交替试验过程中，试件接触水时间较长，故可忽略相对湿度变化对混凝土内氯离子扩散系数的影响。同时，混凝土表面区域处于润湿状态，故可将环境湿度设定在100%左右。然而，干燥过程中相对湿度对混凝土内的氯离子扩散系数存在显著影响，相应的影响系数（*f*）可由下式计算：

 （5.4.5）

式中：*HC ——*临界相对湿度，一般取*HC*＝75%；

*H——*环境相对湿度（%）。

由于实验中相对湿度影响系数一般取0.7-0.85，根据上式计算可得干燥过程中环境的相对湿度应取80%-85%。

5.4.6 自然条件下的混凝土试样表面液膜存在由厚变薄、由湿变干的周期循环过程。为保证模拟试验与自然环境存在良好的相关性，故试验环境中也应该设定一个浸润、潮湿和干燥的循环过程，以保证混凝土近表面润湿为毛细管作用为主导。通过已有研究选取了喷雾时间与温湿时间相同，并保证每天有充足时间风干时间。

5.4.7 为模拟混凝土结构现场真实情况下的劣化特征，模拟环境试验干湿时间比例需与真实情况保持一致。考虑到服役环境中主要环境参数（干湿比例、平均温度）测试与整理的可操作性，以服役环境中的一个月为基准来计算干湿时间比和试验周期。在氯盐浓度提升侵蚀速度加速2.5倍、温度提升侵蚀速度加速4倍情况下，干湿循环周期为30/（2.5×4）=72小时。

5.4.8 干燥过程中混凝土表面的相对湿度和模拟环境相对湿度间存在差异，为了消除混凝土表面和模拟环境之间的湿度梯度，故对模拟试验的循环风速提出要求。

## 5.5 试验制度

5.5.4 循环周期是基于干湿时间比设定，通常沿海潮汐时间为24小时；在无条件测试情况下，推荐的试验周期为72小时。考虑到每月时间为30天，故相应的试验取样周期宜为10个周期及其整数倍数。对于全浸泡试验周期，为便于计算故选取以天为单位，且宜以10天整数倍为基准计算试验时间。

5.5.5 考虑到氯盐侵蚀可导致混凝土内钢筋锈蚀，故以混凝土保护层厚度处钢筋锈蚀为停止条件之一。

## 5.6 测试内容

5.6.2 盐雾沉降量测试方法应该按照现行标准《电工电子产品环境试验 第2部分：试验方法 试验Ka：盐雾》GB/T 2423.17-2008中相关的规定。

5.6.3 混凝土表面氯离子浓度越高，则内外部氯离子浓度梯度越大。混凝土中氯离子浓度差与氯离子扩散速度密切相关。混凝土表面氯离子浓度除与环境条件有关外，还与混凝土自身材料有关。为保证混凝土内氯离子含量分布拟合曲线精度和完整性，应根据设置的试件尺寸和保护层厚度设置测试点，在暴露表面与具有初始氯离子含量为0.03%混凝土深度处应设定不少于6个测试点。检测及操作等应参照《混凝土中氯离子含量检测技术规程》JGJ/T 322-2013中相关的规定。

5.6.4 根据电化学原理，金属钝化膜发生破坏时，金属表面以很大的阳极电流密度进行阳极溶解，相应的金属电极总阳极电流急剧增大。钢筋腐蚀电流可由下式计算：

 （5.6.4）

式中：*βa*和*βc*分别是阳极和阴极过程的Tafel常数；*Rp*为锈蚀体系的极化电阻。钢筋锈蚀电流密度值与钢筋锈蚀状态的关系如下表：

表5.6.4 线性极化法测定的钢筋锈蚀速率特征值

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 极化电阻  （KΩ·cm2） | 锈蚀电流密度（uA/cm2） | 金属损失率（mm/年） | 锈蚀速率 |
| 2.5-0.25 | 10-100 | 0.1-1 | 极高 |
| 25-2.5 | 1-10 | 0.01-0.1 | 高 |
| 250-25 | 0.1-1 | 0.001-0.01 | 中等 |
| ＞250 | ＜0.1 | ＜0.001 | 不锈蚀 |

## 5.7 测试结果与分析

5.7.3 混凝土氯离子扩散系数是反应混凝土耐久性重要指标。通常采用混凝土内不同深度处氯离子含量，根据Fick定律拟合求解混凝土内的氯离子扩散系数。混凝土氯离子扩散系数不仅与混凝土材料组成、内部孔结构数量、水化程度等内在因素有关，还受到外部因素（包括温度、养护龄期、掺合料种类及含量、诱导钢筋腐蚀氯离子类型）影响。利用Fick第二定律在边界条件恒定以及半无限介质假设条件下，拟合求解混凝土内氯离子扩散系数*D*和混凝土表面氯离子含量。在干湿交替过程中，氯离子在混凝土表层对流区深度内主要通过孔隙液在压力、毛细吸附力以及电场作用力下发生的定向传输，混凝土内氯离子分布规律不明显，超过的深度后，氯离子进入扩散作用主导区。在干湿交替过程中，求解混凝土内氯离子扩散系数时，需要考虑氯离子对流区深度。

5.7.4 *n*可以根据不同侵蚀时间*t*的混凝土内氯离子扩散系数*Dt*通过拟合获得。在拟合数据不充分时，也可通过下述关系式估算：

 （大气区）

 （干湿交替区域）

 （水下区）

式中： *W/B* ——混凝土水胶比；

％*FA——*粉煤灰在胶凝材料中占的百分比（%）；

％*SG——*矿渣在胶凝材料中占的百分比（%）。

5.7.5 研究者对于混凝土表面氯离子含量与时间之间关系进行了研究，并提出了多种不同的表示方式。在对比已有研究成果，并综合考虑表达形式简单和拟合方便选取了此关系表达式。公式中*a*、*b*值可根据不同时间下的*C*s拟合得到。在拟合数据不充分时，*b*值也可根据下表取用：

表5.7.5-1 常数*b*建议取值

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 水下区 | 干湿交替区域 | 大气区 |
| 0.15 | 0.40 | 0.20 |

混凝土表面氯离子含量在时间超过一定值时将趋于定值，建议室内环境下取*t*=1000d。服役环境下的*t*值可根据《既有混凝土结构耐久性评定标准》中相关的规定取用，见下表：

表5.7.5-2 氯盐环境中混凝土表面氯离子浓度达到稳定值的时间*t*

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 环境类型 | 环境状况 | *t*（a） |
| 近海大气环境 | 离海岸0.5 km≤*d*<1.0km | 20~30 |
| 离海岸0.25 km≤*d*＜0.5km | 15~20 |
| 离海岸0.1 km≤*d*＜0.25km | 10~15 |
| 离海岸*d*＜0.1km | 10 |
| 海洋环境 | 大气盐雾区 | 0~10 |
| 水位变动区、浪溅区 | 0 |

5.7.7 不引起钢筋去钝化的混凝土孔隙液中游离氯离子最高含量称为混凝土氯离子临界含量*C*r，即钢筋脱钝对应的氯离子含量阈值。该值受许多因素影响，如混凝土配合比、水泥类型、水泥成分含量、混凝土材料、水灰比、温度、相对湿度等。因此，应考虑各种因素对氯离子阈值的影响，相应的阈值可采用表5.7.6取用。

6 硫酸盐环境中混凝土结构耐久性室内模拟环境试验方法

## 6.1 一般规定

6.1.1 当混凝土结构同时遭受其它环境因素作用时（如冻融、碳化、冲刷和风蚀等），应考虑其它环境因素和硫酸盐对混凝土结构硫酸盐侵蚀影响作用。若由混凝土结构劣化由硫酸盐侵蚀主导，宜采用本规定开展混凝土结构硫酸盐侵蚀室内模拟环境试验，但应根据经验考虑其它侵蚀环境作用的影响。若混凝土结构劣化由其它环境因素侵蚀主导，则不宜采用本方法。

硫酸盐侵入混凝土内部可发生物理化学反应，导致体系化学平衡状态破坏，可引起水泥水化产物分解、无胶凝性物质与膨胀性物质生成、盐类析晶等，使得混凝土性能降低、微观结构破坏、保护层发生损伤开裂，从而引发混凝土结构耐久性劣化。不同自然环境中混凝土结构遭受硫酸盐侵蚀机理、侵蚀方式、劣化形式和性能退化规律等存在差异，应根据服役环境中混凝土结构耐久性退化真实情况和环境特征，确定室内模拟环境试验制度及其参数取值，避免因室内模拟环境试验制度参数设定不当而造成的混凝土结构耐久性结果失真。全浸泡环境条件下混凝土结构侵蚀一般可忽略物理侵蚀破坏，应以化学侵蚀为主。干湿交替、半埋入和半浸泡环境条件下硫酸盐侵蚀应根据自然环境因素（如温度、相对湿度和盐浓度等）存在差异，一般认为侵蚀机理应为物化共同耦合作用。对于低浓度盐溶液和高湿环境中，混凝土结构耐久性退化应以化学侵蚀为主。对于高浓度-干燥环境中，混凝土结构耐久性退化应以物理侵蚀为主。其它环境条件下，可能为物理和化学侵蚀共同耦合作用。在具备热力学参数条件下，混凝土结构硫酸盐侵蚀机理、生成物种类及含量等，可采用热力学和动力学分析计算确定。现有标准和研究多集中在全浸泡与干湿交替方式侵蚀，考虑到混凝土结构服役现场工况，故本方法对干湿交替、半埋入、半浸泡和全浸泡方式的混凝土侵蚀都进行了考虑。

6.1.2 环境分类参照《混凝土结构耐久性设计与施工指南》CCES 01－2004中第3章设计基本规定和第7章化学腐蚀环境。考虑到混凝土结构服役现场工况存在干湿交替、半埋入、半浸泡和全浸泡方式的混凝土侵蚀，故本方法对其均进行了考虑并根据几种侵蚀形式特征对其进行分类。环境中的水下区、土中区、干湿交替区、半埋入、半浸泡和大气区的划分，参照了氯盐环境中结构部位划分且考虑了实际情况中混凝土硫酸盐侵蚀方式。此外，还参照了《混凝土结构耐久性设计规范》GB/T 50476-2008。考虑到含硫酸盐侵蚀的化工厂侵蚀状况特殊且差异显著，故暂时不列入本标准讨论范围。

6.1.3 区分环境参数主要和次要环境作用因素，主要环境作用因素可用于设定室内模拟环境试验控制参数，次要环境作用因素作用采用修正因子间接修正主要环境作用因素或修正混凝土耐久性相似关系结果。鉴于当前研究主要是聚焦在主要环境作用因素用于确定试验制度及参数方面，有关次要环境作用因素对试验结果修正方面的探讨将在后续研究工作中开展。相应的次要环境作用因素修正因子取值范围等也将在后续标准修订中补充完善。

## 6.2 试件要求

6.2.1 现有的混凝土抗硫酸盐侵蚀试验采用混凝土试件的尺寸差别很大，经统计主要有：10mm×10mm×30mm、10mm×10mm×60mm、25mm×25mm×280mm、25mm×25mm×285mm、40mm×40mm×160mm、100mm×100mm×100mm等。试验结果表明，尺寸较小的混凝土试样测试试验结果离散度高，而大尺寸的混凝土试件测试实验结果可靠度高。此外，部分构件需要轴心抗压和抗折强度指标。试件尺寸选择主要是根据国内的混凝土抗硫酸盐侵蚀试验标准 （GB/T 749-1965、GB/T 2420-1981、GT/T 749-2001）以及美国材料与测试协会的标准ASTM 1012和ASTMC 452。我国《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082-2009明确规定，混凝土抗硫酸侵蚀试验需采用 100mm×100mm×100mm立方体混凝土试样。对于不考虑形状及受力等因素影响的混凝土结构，宜通过测定混凝土抗硫酸盐侵蚀性能变化进行评定，故参考《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082-2009中试件尺寸为100mm×100mm×100mm立方体。考虑到混凝土性能测试中常采用150mm×150mm×150mm的立方体混凝土试样，故也可根据需要选取该尺寸试样。试件组数和个数要求应参考《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082-2009中抗硫酸盐侵蚀试验相关规定，如表6.2.1。

表6.2.1 抗硫酸盐侵蚀试验所需试件组数

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 设计抗硫酸盐等级 | KS15 | KS30 | KS60 | KS90 | KS120 | KS150 | KS150以上 |
| 检查强度所需干湿循环次数 | 15 | 15及30 | 30及60 | 60及90 | 90及120 | 120及150 | 150及设计次数 |
| 鉴定28d强度所需试件组数 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 干湿循环试件组数 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 对比试件组数 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 总试件组数 | 3 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |

6.2.3 因混凝土试样制备采用的骨料粒径不同，为控制混凝土离散型和保证内部均匀性，并与现行标准进行统一，故参照现行国家标准《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082-2009对试件最小截面尺寸做了规定，一般试件是最小边长或直径为骨料最大粒径三倍关系，如表6.2.3。

表6.2.3 试件最小横截面尺寸选用表

|  |  |
| --- | --- |
| 骨料最大公称粒径（mm） | 试件最小横截面尺寸（mm） |
| 31.5 | 100×100或ϕ100 |
| 40.0 | 150×150或ϕ150 |
| 63.0 | 200×200或ϕ200 |

为提高试验对比性和通用性，有关试模制作、试件制作和养护等均保持与现行国标一致。试验方法设计的试件形状、尺寸和形式等存在差别，相应试件要求的精度和公差也不同，故试件精度和公差对试验结果也有影响。为提高本方法的通用性和适用性，借鉴了现行国标中部分一般规定的通用要求。混凝土结构的承载能力主要由钢筋和内部混凝土承担，其硫酸盐侵蚀体现为混凝土表层（保护层）粉化、开裂和逐层剥蚀；考虑到尺寸效应和受力状况等因素影响，故对相应的材料、混凝土保护层最小厚度、钢筋粘结锚固、保护层厚度设计值等提出要求。

## 6.3 试验设备

6.3.1 试验中温度低于0℃接近溶液冰点，溶液内侵蚀介质通过扩散对流进入混凝土及其内部传输受限，故设定低温下限为该值。考虑到混凝土内水化产物（AFt）理论计算的分解温度约为60℃，并且自然服役状况下的混凝土温度一般低于该值，考虑到设备温度精度波动范围、滞后缓存等，故设定试验设备上限温度为70℃。对于全浸泡侵蚀是通过调整溶液浓度和温度加上侵蚀过程，故应在环境模拟室内设置一个溶液箱以便于保持试件浸泡。

6.3.2 对于水溶性硫酸根离子含量均采用国家标准《混凝土结构耐久性设计规范》GB/T 50476-2008提供的方法测定，并且要求相应的测试设备性能指标与之相同。

6.3.3 考虑到混凝土硫酸盐侵蚀评价指标敏感性，故对相应的重量和尺寸精度提出了要求。

## 6.4 试验参数

6.4.1 当模拟在水下区域的构件情况时，构件长期浸没于含水中（海水、地下水等）， 故模拟时只需要将试件浸泡于盐溶液中，试验过程中仅考虑温度和溶液浓度对试样硫酸盐的影响。干湿交替、半埋入、半浸泡等情况下，一般采用的方法是将试件浸湿一段时间、风干，浸润与风干按一定时间比例循环交替进行。相应的试验控制参数为温度、湿度、溶液浓度和干湿时间比等。

6.4.2 对于混凝土发生钙矾石类型侵蚀破坏的硫酸盐浓度约为2%以内，而发生石膏、盐析晶破坏类型的理论计算盐溶液浓度5%以上。因现行国标采用了5%浓度的硫酸钠溶液作为侵蚀溶液，可优先考虑该值以便于与既有成果对比。若要加速盐析晶破坏的发生则可考虑硫酸钠溶液浓度为10%。

6.4.3 溶液pH值对侵蚀产物热力学和动力学反应影响显著，为了保障试验侵蚀机理、过程和结果与现场服役状况下退化情况相同，故需保证pH值近6-9范围内。同时，为了确保盐溶液浓度、盐含量等均一，故每两周更换一次溶液。

6.4.4 温度对混凝土内离子扩散和反应具有加速效应。温度对混凝土内离子化学反应平衡加速效应，采用下式计算加速倍数*nK-T*：

 （6.4.4-1）

基于温度对离子扩散系数和化学反应平衡加速倍数相同前提，可通过理论计算来确定试验各温度阶段的试验温度值。对于化学反应：

 （6.4.4-2）

体系化学反应达到平衡时，其相应的化学反应速率微分形式表达式可表示为：

 （6.4.4-3）

式中：*v*B为化学反应式中物质B的系数（对于反应物则*v*B取负值、而对于生成物则*v*B取正值）；*r*为化学反应的速率。体系相应的正向和逆向反应速率表示为：

和 （6.4.4-4）

式中：*k*+和*k*-分别表示正向和逆向反应速率常数。

体系的总化学速率为两者之差，当两者相等时体系为动态平衡态，相应的平衡常数*K*eq可表示为：

 （6.4.4-5）

有鉴于此，若不考虑体系中物质浓度变化的影响，并将正向与逆向反应均视为基元反应，则体系反应速率由水泥体系中低分解速率反应性的物质浓度控制，则可将相应正逆反应速率之比视为控制体系的主导因素。若将两者之比视为温度的函数，则温度对体系化学动力学影响（化学反应速率常数）就转为平衡常数与温度间的函数。从上述混凝土硫酸盐侵蚀机理部分推导可知，体系相应的平衡常数可采用下式表示：

 （6.4.4-6）

因此，温度对化学反应速率常数的加速倍数可表示为化学平衡常数随温度变化函数之比，即式6.4.4-6。混凝土内硫酸盐侵蚀主要生成物为硫酸钙类（石膏类）、继发性钙矾石（AFt）类或者硫酸钠盐类物质中的一种或多种。通过选取拟定的生成物，进而确定体系的常数（B、C、D、E），则可进行计算相应的加速倍数。

考虑到无水硫酸钠和十水硫酸钠晶型转化温度，故设定了一个低于该转化温度值30℃。至于干湿循环试验采用三个温度段（30℃/40℃/50℃），是考虑了加速、晶型转化等效果。为了便于开展试验，仍选取了相同的温度段及其温度值。各个不同地区温度存在差异，可以通过分别计算各温度段的加速倍数，利用温度段时间比，计算综合的加速倍数。

6.4.5 温度越高离子迁移能力越强，其扩散系数越大。为了达到加速目的，试验多选择较高的试验温度。因而，模拟环境试验制度采用的温度应高于混凝土结构使用现场的自然环境温度。然而，过高的温度会引起离子扩散机理的变化或导致水泥混凝土中水化产物的分解，从而导致模拟环境试验的失败。简言之，模拟环境试验制度参数中的温度取值应遵循以下几点原则：（1）应选用较高的温度起到加速效果。（2）所选用温度不能造成硬化体系稳定性变差（60 ℃以上会引起体系中铝酸盐水化物分解，故最高温度不应高于此温度）。（3）在相应温度下的离子侵入混凝土体系机理与自然环境相似或相同。基于平均温度和月数，将服役地区温度进行筛选、划分，以确定室内模拟环境试验温度取值基准和比例。选择以月平均温度为基准，可参考已发表相关论文（月均温度即可体现短时间内日均温度变化特征，又可保证数据简易化处理、操作容易）。以长沙为例，长沙地区2000-2010年全年平均温度和相对湿度，如图6.4.5所示。



图6.4.5长沙地区全年温度和相对湿度

从图6.4.5中可以看出，长沙地区多年月均温度变化规律显著，温度基本介于5-30℃之间；相应的相对湿度基本在75%左右波动。有鉴于此，在温度划分时拟不考虑相对湿度变化的影响。因而，拟将温度基本相等的月份大致划分为三段：低温阶段（温度为10℃左右，11、12、1、2和3月），中温阶段（温度为20℃左右，4和10月），高温阶段（温度为30℃左右，5、6、7、8和9月）。从而确定了全年各个温度阶段对应的时间比为5：2：5。

循环周期是基于喷淋时间和干燥时间设定，对于普通混凝土（C50及其以下，饱和度不低于0.85）液态水传输进入混凝土表层5mm范围内时间约为1h，而对应的干燥过程将吸入的水蒸发出来（环境相对湿度为50%）时间约为71h，故计算出的试验周期为72h。

6.4.6 相对湿度可影响混凝土表层孔隙内含水率（饱和度），进而影响混凝土内孔隙硫酸盐溶液浓度、盐结晶-溶解、生成物。考虑到我国大部分地区气候特征和现有试验方法及其设备除湿度效果，故干燥过程采用50%相对湿度。室内模拟环境试验喷淋过程中，溶液直接接触混凝土试样，考虑到试验可操作性和试验条件必要性，故设定喷淋润湿过程中环境的相对湿度为100%。要保证模拟环境试验中出现Na2SO4晶体和Na2SO4∙10H2O晶体的转换，则温度变化区间需包含32.4℃这一温度转变点。研究表明AFt的分解温度约为60-70℃，且自然环境中出现的最高温度一般不高于60℃，故高温区域的范围应为（32.4℃≤*T*high≤60℃）。对于模拟环境试验的低温阶段，考虑到低于冰点后，盐溶液有区域结冰倾向且化学反应和离子扩散速率降低较快而起不到加速效果，故假定采用低温阶段范围为（0℃≤*T*low≤32.4℃）。高温阶段（大于32.4℃）要析出Na2SO4晶体的最大相对湿度约为85%，而低温阶段（小于32.4℃）要析出Na2SO4∙10H2O晶体的最小相对湿度约为60%；故相应的具体相对湿度值范围可做温度轴的垂线而确定。综上可知，高温阶段（大于32.4℃）若要保证析出Na2SO4晶体前提下，60%≤RH≤85%。低温阶段（小于32.4℃）若要保证析出Na2SO4∙10H2O晶体前提下，50≤RH≤100%。因此，RHmin为50%。有鉴于此，拟定了喷淋阶段的环境相对湿度为95%以上，干燥阶段的环境相对湿度为50%。

6.4.7 试验测试和数值分析表明风速超过3m/s时，则可将环境相对湿度视为混凝土表层相对湿度。特定的环境湿度和混凝土内部饱和度条件下，混凝土表面的循环风速所能影响的深度为定值。这是因混凝土内部向混凝土表层传输的水分量与混凝土表层和外界环境间水分传输的量达到动态平衡造成的。

## 6.5 试验制度

6.5.4 循环周期是基于喷淋时间和干燥时间设定，对于普通混凝土（C50及其以下，饱和度不低于0.85）液态水传输进入混凝土表层5mm范围内时间约为1h，而对应的干燥过程将吸入的水蒸发出来（相对湿度为50%）时间约为71h，故计算出的试验周期为72h，即为3d。考虑到每月时间为30d，故相应的试验取样周期宜为10个周期及其整数倍数。对于全浸泡时间为保持侵蚀时间的便于计算故也选取以天为单位，且宜以30d及其整数倍为基准时间。

6.5.5 第一条参照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082-2009中相关的规定。第二条考虑到硫酸盐侵蚀导致混凝土保护层剥蚀脱落，丧失对钢筋锈蚀保护作用，故以试件截面剥蚀深度达到保护层厚度为停止条件之一。

6.5.6 全浸泡试验的浸泡龄期从试件浸泡入溶液中起计时，并且应以天为单位计算。干湿循环试验应采用室内模拟环境试验箱内的喷液装置，将配制好的硫酸钠溶液均匀喷淋于试样表面。试验条件不允许情况下，干湿循环试验周期可为72h。试验应从喷淋开始起计时，喷淋时间应为1h，并且应控制室内模拟环境试验箱内相对湿度为95%以上、温度为30℃。喷淋过程结束后，应立即开展71h的干燥过程。干燥过程中应控制相对湿度为50%，应先控制温度为30℃且持续29h、再升温至40℃持续12h、继续升温至50℃持续30h。每完成上述的一个喷淋过程和一个干燥过程即为试验的一个干湿循环。干燥过程结束后，室内环境模拟试验箱应自动按照进行下一次干湿循环试验。试验过程中宜定期检查和调整溶液的pH值与浓度，应维持溶液的pH值在6至9之间且每两周更换一次溶液。为了保证初始条件和温度场均匀，试验开始前应保持模拟箱内部温度为30℃且维持6h以上。

## 6.6 测试内容

6.6.1至6.6.4 鉴于混凝土试件性能要求不同，故对提出了不同的混凝土试件性能评价指标。

## 6.7 测试结果与分析

6.7.2 混凝土强度对硫酸盐侵蚀较为敏感，GB/T 50082-2009等均以混凝土抗压强度变化作为混凝土硫酸盐侵蚀损伤评价指标,故也借鉴了该性能指标作为混凝土硫酸盐侵蚀劣化评价标准。

6.7.3 硫酸盐侵蚀会导致混凝土试样重量发生变化，侵蚀初期混凝土质量增加，随着侵蚀劣化发展其将发生剥蚀，故相应的重量降低。在部分标准中，采用了重量变化率作为评价指标。因此，本方法也推荐了该性能参数作为混凝土硫酸盐侵蚀劣化评价标准。

6.7.4 中国《水泥抗硫酸盐侵蚀试验方法》GB/T 749-2008、《硅酸盐水泥在硫酸盐环境中的潜在膨胀性试验方法》GB/T 749-2001和美国《暴露于硫酸盐中波特兰水泥的潜在膨胀测试方法》ASTMC 452-95均以膨胀率作为混凝土硫酸盐侵蚀指标，故也参照上述指标参数作为混凝土硫酸盐侵蚀评价指标。

6.7.5 混凝土试件截面剥蚀深度是混凝土表面侵蚀程度及其速率的重要参数，通过特定时间内截面剥蚀深度变化计算相应的侵蚀时间，可为预测混凝土硫酸盐侵蚀耐久性评估和使用寿命的数值模拟提供必要的参数。

6.7.6 采用混凝土硫酸盐侵蚀模型和Fick定律量化混凝土硫酸盐侵蚀状况，均需测定混凝土某一深度处硫酸盐含量及其变化，故采用将其设定为测定指标。混凝土内硫酸盐测定参考《混凝土结构耐久性设计规范》（GB/T 50476-2008）。

6.7.7 鉴于混凝土硫酸盐侵蚀可引起混凝土剥蚀、保护层脱落、截面尺寸变化和钢筋锈蚀等问题，故对应钢筋混凝土构件除了测定上述性能参数外，还应考虑硫酸盐侵蚀对其承载力影响。

# 7 冻融环境中混凝土结构耐久性室内模拟环境试验方法

## 7.1 一般规定

7.1.1 本条规定冻融环境中混凝土结构室内模拟环境试验方法的适用范围。混凝土和混凝土结构的抗冻性和抗盐冻性能试验宜参考本方法和现行国家标准《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082-2009进行。

7.1.2 环境分类参照《混凝土结构耐久性设计规范》GB/T 50476-2008中第5章冻融环境。冻融环境下，造成混凝土损伤的主要破坏作用为冻结、融化过程中的静水压和渗透压导致的疲劳作用，故环境中水或盐溶液的冻结温度和融化温度是影响冻融破坏作用的主要因素。因此，本方法针对混凝土面临的水或盐冻融问题进行了分类讨论。

## 7.2 试件要求

7.2.1 对于无配筋要求的素混凝土试件，参考现行国家标准《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082-2009对试件尺寸的规定。

7.2.2 为了保证混凝土结构构件与正常服役状况下具有相同的性能特征，故对试件制作养护等做了规定。当环境温度变化时，距表面200mm处混凝土的温度达到与环境温度一致时至少需要8h，综合考虑混凝土环境模拟试验箱的升降温速率、试验周期、性能检测等，用于抗冻性检测的混凝土构件的最小横截面尺寸宜不大于400mm。

## 7.3 试验设备

7.3.1 冻融试验箱的各项参数指标应符合现行国家标准《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082-2009中相关的规定。室内模拟环境试验箱应具有制冷、制热和水雾喷淋的功能。室内模拟环境试验箱的制冷和制热功能可实现模拟试验的冻融循环。所述的水雾喷淋功能主要是在融化期间为混凝土构件融化提供传热介质（水）。

7.3.2 本条对混凝土室内模拟环境试验箱的温度控制能力作了规定。要求各点温度极差相较于慢冻法试验箱的温度要求放宽1℃，是考虑混凝土室内模拟环境试验箱的容积较大，各点温度分布不均匀等因素。

7.3.3 鉴于混凝土冻融循环形式、温度场均匀性等，故对试验设备参数及操作控制系统功能等提出了要求。

7.3.4 参照现行国家标准《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082-2009对超声波测定仪的主要性能参数作了规定。

7.3.6 规定了混凝土室内环境模拟试验箱的温度传感器的温度检测范围和精度。

## 7.4 试验参数

7.4.2 有研究结果表明，冻结温度对混凝土的冻融破坏有显著影响。冻结温度越低，冻融破坏越严重。在-5℃冻结时混凝土所能经受的最大冻融循环次数远远高于在-10℃、-18℃和-28℃冻结时的次数。考虑试验的周期和效率，当自然环境的正负温交替季节的平均日最低气温高于-10℃，宜采用较低的冻结温度来加速试验，推荐的冻结温度为（-10±2）℃。研究结果表明，混凝土内部大部分毛细孔隙中的水在-18℃时可以冻结。



图 7.4.2 冻结温度与混凝土破坏关系

7.4.4 有研究结果表明，质量浓度为2%~4%的NaCl溶液对混凝土产生的盐冻剥蚀破坏效应最严重。自然环境中的盐种类和浓度变化较大且不均匀，考虑到盐溶液作为试验的主要控制参数，故参照现行标准中的盐冻试验采用质量浓度为3%的NaCl溶液，也便于与既有研究成果进行对比。

## 7.5 试验制度

7.5.5 考虑了室内模拟环境试验箱用于检测混凝土构件的可行性，采用单位面积剥落量和相对动弹性模量作为主要评价指标。同时，采用单位面积剥落量不超过1.5kg/m2、相对动态弹性模量不低于60%时的最大冻融循环次数，作为评价指标来衡量混凝土构件的抗冻性能优劣。

7.5.6 规定了用于抗冻性检测构件的试验龄期。试验龄期一般为28d，设计有特殊要求时按照设计要求进行。浸泡时间统一为4d。对混凝土构件在混凝土室内模拟环境试验箱中的放置方式也作出了规定。对于尺寸较大的构件，试验过程中不易搬动，应在构件放入前即在构件底部放置浅盘，用于收集冻融过程中产生的剥落颗粒。对混凝土构件与钢筋接触面积、与箱体内壁之间空隙、构件之间空隙的规定，是为了保证试验过程中试件服役环境条件一致。冷冻结束后，混凝土室内模拟环境试验箱转入融化阶段，融化阶段喷淋水雾既可加速融化的速度，又可保证混凝土与水接触，以便在下次冷冻过程中吸水达到加速劣化效果。喷淋用水的水温应保持在（5±2）℃，是为了避免产生过大的温度应力。根据混凝土构件尺寸也规定了融化时间，冷冻时间足够长才能保证混凝土构件距表面50mm处达到冻结温度。

## 7.6 测试内容

7.6.1 测量混凝土结构的尺寸，查看有无裂缝、破损和掉角等情况。对于尺寸和质量较大的构件，可在条件允许或必要时称量质量，冻融循环过程中混凝土结构的质量损失不作为主要评价指标。

7.6.2 规定了每25次冻融循环检查一次混凝土结构的外观、剥落的颗粒称量，必要时可测定混凝土试样重量。

7.6.3 对超声法检测混凝土结构声时的方法作了规定。

# 8 环境与荷载共同作用下混凝土结构耐久性室内模拟环境试验方法

## 8.2 试件要求

8.2.1至8.2.3 对构件尺寸、养护、制作和保护层等提出了要求，从而保证试验结果可重复性和精确度。

## 8.3 试验设备

8.3.4 可参考《混凝土结构试验方法标准》GB/T 50152-2012中的规定选用，对于承受持续荷载的混凝土构件也可采用对拉弹簧螺杆自平衡加载模式，如图8.3.4所示。

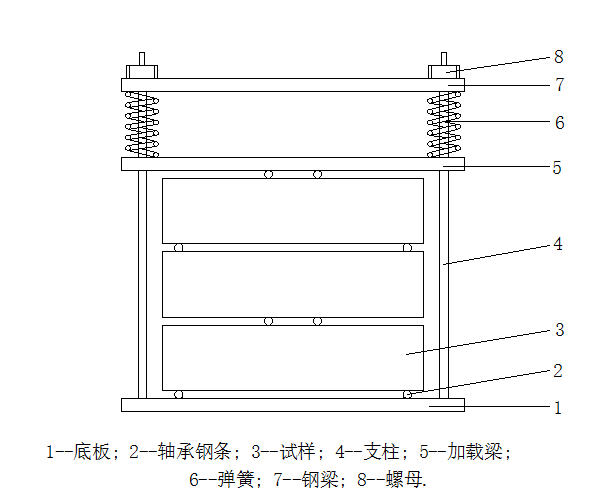


图8.3.4 混凝土对拉弹簧螺杆自平衡加载装置示意图

## 8.5 试验制度

8.5.1 开展试验前应通过计算或者实际测试构件的开裂荷载，以便于确定预试验施加荷载。

8.5.3 开展试验前应通过计算或者实际测试构件的极限荷载，以便于确定试验施加荷载值。《混凝土结构试验方法标准》GB/T 50152-2012和《预应力混凝土枕疲劳试验方法》TB/T 1878-2002均提出了采用理论计算求解极限承载力或荷载上限值，以便于开展试验或检验破坏强度是否满足标准。

在试验过程中，同步作用形式是疲劳荷载与模拟环境作用同时进行；交替作用形式是进行若干次疲劳荷载（或环境作用）试验后，再进行若干次环境作用（或疲劳荷载）试验。对于常见结构工程，环境作用引起的耐久性问题效应较小，而疲劳荷载相对显著，故先开展疲劳荷载试验，随后再进行环境荷载试验。考虑到疲劳荷载和环境荷载作用时间较长，兼顾试验周期和可操作性，故以构件疲劳寿命的10%或每10万次为一加载时段。室内模拟环境试验周期多为3天（氯盐或硫酸盐侵蚀等），考虑到一个月的环境荷载作用基本为室内模拟环境试验的10次或其整数倍，故采用其作为一个环境荷载加载时段。

# 9 自然环境和室内模拟环境中混凝土结构耐久性时间相似关系

## 9.1 一般规定

9.1.1 大气环境、氯盐环境、硫酸盐环境中混凝土结构耐久性劣化或内部的侵蚀介质浓度具有较强的累积效应，侵蚀效果会随侵蚀时间延长而不断增强。然而，混凝土结构冻融破坏特征不同于混凝土氯盐、碳化和硫酸盐等。研究表明混凝土内部孔隙水含量（饱水度）、孔隙水冰点和环境温度之间存在对应关系。混凝土内孔隙水饱和度达到某定值且环境温度低于特定值（一般认为-5℃），混凝土内部孔隙水才会结冰并导致微观结构损伤和性能劣化。当混凝土内孔隙饱水度大于某定值时，在冻融循环作用下混凝土内部才产生损伤，并且该损伤会随冻融循环次数增加而累积，损伤累积到一定程度后可导致混凝土发生冻融劣化，表现为混凝土表层剥落和动弹性模量降低等。当混凝土内孔隙饱水度低于某定值时，则混凝土不产生或极少出现微观结构劣化，该类损伤不会累积且对混凝土性能影响极小。换言之，冻融环境中混凝土饱水度存在确定阈值与相应的冻融环境温度一一对应。仅当混凝土内部孔隙饱水度达到某阈值以后，环境冻融循环才会引起混凝土结构耐久性劣化。

研究表明环境温度低于-5℃对混凝土有损害，故将-5℃称为混凝土的有害冻结温度上限。通常情况下，冻融环境中混凝土结构损伤劣化程度随有害冻结温度降低和冻融循环次数增加而增大。环境对混凝土冻融损伤可采用有害冻融循环次数表征，对于某地区的混凝土结构有害冻融循环次数的平均值可根据服役环境温度确定（通过实测、调查或查阅气象资料）。当最冷月平均气温低于-10℃时，若计算得到的混凝土年有害冻融循环次数不足60，则按照60次计。鉴于混凝土饱水度和冻结温度等对混凝土冻融劣化影响显著，《季节性冻土地区公路设计与施工技术规范》JTG/T D31-06-2017中冻融环境等级划分同时考虑了混凝土饱水状态（中度和高度饱水）和有害冻融循环次数。

有鉴于有关冻融环境条件下的室内模拟环境中和自然环境中混凝土耐久性劣化相关关系研究尚不充分，本标准中的冻融环境条件下混凝土结构耐久性相似关系可根据服役环境情况和室内模拟环境试验之间的对应关系确定，具体步骤如下：首先，根据混凝土结构服役环境确定有害冻融循环次数的平均值。然后，若条件允许情况下，可根据服役环境温度开展室内模拟环境试验；若条件不充分时，可采用本标准第7章的试验方法进行研究。一般将可将一次室内模拟环境冻融循环试验等效为一次服役环境下有害冻融循环，故将混凝土年有害冻融循环次数的平均值作为室内模拟环境试验冻融循环次数以模拟一年的冻融劣化。最后，根据本标准第7.5.5条涉及的试验停止条件，确定相应的混凝土耐久性年限。该法可避免现场试验方法耗时过长等缺点，可在短时间内实现冻融环境中混凝土结构耐久性劣化，具有较好的相关性和加速效果。

## 9.2 基本要求

9.2.2 第三方参照物室内模拟环境试验可单独预先开展，也可与研究对象室内模拟环境试验同时进行。基本思想是混凝土结构耐久性劣化因素分为内因和外因，相同服役环境中环境因素对混凝土结构作用效应相同，即环境荷载作用效应等同。在使用第三方参照物试验法时，应选取与研究对象具有相同或相似环境条件下且具有一定使用年限的第三方参照物。同时制作与研究对象和第三方参照物具有相同材料试件，根据确定的室内环境模拟环境试验制度开展试验。根据测试内容与评价指标确定第三方参照物和研究对象在室内模拟环境试验中时变规律。同时，根据第三方参照物在自然环境和室内模拟环境中混凝土结构耐久性时变模型，建立第三方参照物在两环境中耐久性退化相似率或相似关系。将第三方参照物耐久性相似率或相似关系等同为研究对象，从而可获得研究对象在自然环境中耐久性退化时变规律及其时变模型。

## 9.3 混凝土结构耐久性时间相似关系

9.3.2 鉴于现有研究在自然和室内模拟环境试验中混凝土内氯离子含量变化相似关系方面较为充分，故仅给出了两环境中上述两参量相似关系。若条件允许或资料齐全时，有关混凝土内钢筋锈蚀电流密度增加率和钢筋质量损失率相似关系可参照混凝土内氯离子含量变化相似关系确定。

9.3.4 鉴于现有研究在自然和室内模拟环境试验中混凝土内硫酸根离子含量变化与试件截面剥蚀深度相似关系方面较为充分，故仅给出了两环境中上述两参量相似关系。若条件允许或资料齐全时，有关混凝土试件抗压强度耐蚀系数、重量损失率、试件膨胀率和混凝土试件极限承载力降低率相似关系可参照上述方法确定。

9.3.6 鉴于有关环境与荷载共同作用下的自然和室内模拟环境试验中混凝土结构构件极限承载力降低率与混凝土结构构件变形增加率相似关系方面较为充分，故仅给出了两环境中混凝土结构构件上述两类性能参数的相似关系。若条件允许或资料齐全时，有关混凝土结构构件疲劳破坏荷载降低率、刚度退化率和疲劳寿命降低率相似关系可参照上述方法确定。