

《混凝土结构设计规范》修订简介(三) ——混凝土结构的耐久性设计

金伟良¹, 邸小坛², 徐有邻²

(1 浙江大学宁波理工学院, 宁波 315100; 2 中国建筑科学研究院, 北京 100013)

[摘要] 强调了混凝土结构耐久性设计的重要性、基本原理及定性设计方法。根据修订规范介绍了:耐久性环境类别;对混凝土材料的耐久性能要求;防止材料劣化的技术措施;延长设计使用年限的方法;使用期的检测、维护要求。可以帮助设计人员理解和执行修订规范的耐久性设计。

[关键词] 混凝土结构; 耐久性; 设计

中图分类号: TU318.4 文献标识码: A 文章编号: 1002-848X(2011)04-0122-04

Introduction of revision of Code for design of concrete structures part III:

Durability design of concrete structures

Jin Weiliang¹, Di Xiaotan², Xu Youlin²

(1 Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo 315100, China;

2 China Academy of Building Research, Beijing 100013, China)

Abstract: The importance, ultimate principle and qualitative design method for the durability design of concrete structures were emphasized. According to the revised standard, the environmental category of durability, the requirements to durability of concrete material performance, the technical measures for preventing material degradation, the method for extending the design working life, the inspection and maintenance requirements of period of use were introduced. It could help designer understand and carry out the durability design of the revised standard.

Keywords: concrete structures; durability; design

1 基本概念

1.1 混凝土材料的耐久性

混凝土抗压强度高,可塑性强,原料可就地取用,比钢、木耐久,配合以抗拉、延性的钢筋,混凝土结构性能优越,在基建工程中得到广泛的应用。在汉语简化字中,“砼-人工石”意味着其可以像石料那样恒久,其实完全是一种误解。实际上,混凝土在浇筑成形过程中就会因为离析、泌水、沉降、收缩在内部形成毛细孔、裂隙和其他缺陷(内因)。使用期还会遭遇不利的环境作用:干湿交替、冻融循环、化学侵蚀等(外因)。这些不利作用随着时间推移逐渐积累,就会引起材料性能劣化,这就造成了混凝土结构的耐久性问题。

1.2 对耐久性的认识

人们对耐久性的认识有一个渐进的过程。20世纪下半叶,美国高速公路几十万座桥梁因除冰盐害而引起普遍腐蚀,造成了巨大、长久、难以解决的损失。由此而提出的“五倍定律”作为前车之鉴,引起了工程界的普遍关注。中国建筑科学研究院于20世纪80年代在全国范围内进行了大规模的结构耐久性调查,此后各单位的耐久性试验研究陆续开展。以此为基础并参考国外标准,21世纪初修订的

规范 GB50010—2002 首次提出了耐久性设计的要求。陈肇元院士主编了《混凝土结构耐久性设计规范》(GB/T50476—2008),提出了更为详尽的土木工程混凝土结构耐久性设计方法。在前述工作积累的基础上,本次规范修订补充、完善了房屋混凝土结构耐久性设计的要求。

1.3 耐久性极限状态

耐久性作用的特点是时间的积累。从观感缺陷、影响使用功能、降低承载力、到最终构件解体结构塌垮,很难用现有的极限状态作明确的描述。根据《工程结构可靠度设计统一标准》(GB50153—2008),目前暂将其列入正常使用极限状态进行设计控制。表现为以下状态:钢筋混凝土构件出现锈胀裂缝;预应力筋表面开始锈蚀;构件混凝土表层出现可见的耐久性损伤(酥裂、粉化等)。当然,如果不及时处理而任由损伤继续发展,还会引起承载力问题,甚至破坏、倒塌。

作者简介:金伟良,教授,博士生导师。
邸小坛,国家建筑工程质量检测中心总工程师,研究员。
徐有邻,中国建筑科学研究院结构所顾问,博士,研究员。
注:本文由徐有邻执笔。

1.4 耐久性的定性设计方法

引起材料性能劣化的耐久性影响因素很多,规律复杂,不确定性太大,而且耐久性试验研究周期太长,除个别工程根据实际情况可以进行专门的定量设计以外,目前还只能根据调查分析和工程经验进行定性设计。设计内容包括四个方面:耐久性环境分类(外因);对混凝土材料的性能要求(内因);防止材料劣化的技术措施(措施);使用期的检测维护要求(维修)。

2 耐久性环境类别(外因)

2.1 影响耐久性的环境因素

影响耐久性的外因是所处的环境,即结构暴露的条件。正常的室内干燥环境一般不会引起耐久性问题,这是建筑结构有利于土木工程其他结构(水工、港工、公路、铁路、市政等)之处。影响混凝土结构耐久性的外部因素主要有以下四类:干湿交替造成钢筋锈蚀;冻融循环造成的混凝土酥裂;氯离子造成的钢筋腐蚀;化学作用引起的混凝土、钢筋性能劣化。根据其耐久性作用的性质和程度进行分类定级。

2.2 耐久性环境类别

混凝土结构暴露的耐久性环境类别从低到高依次排列,如表 1 所示。

混凝土结构的环境类别 表 1

环境类别	条件
—	室内干燥环境;无侵蚀性静水浸没环境
二 a	室内潮湿环境;非严寒和非寒冷地区的露天环境;非严寒和非寒冷地区与无侵蚀性的水或土壤直接接触的环境;严寒和寒冷地区的冰冻线以下与无侵蚀性的水或土壤直接接触的环境
二 b	干湿交替环境;水位频繁变动环境;严寒和寒冷地区的露天环境;严寒和寒冷地区冰冻线以上与无侵蚀性的水或土壤直接接触的环境
三 a	严寒和寒冷地区冬季水位变动区环境;受除冰盐影响环境;海风环境
三 b	盐渍土环境;受除冰盐作用环境;海岸环境
四	海水环境
五	受人为或自然的侵蚀性物质影响的环境

2.3 对环境类别的说明

引起钢筋锈蚀的必要条件是水和氧气的交替作用,因此室内干燥环境及静水浸没环境中的构件基本不会发生耐久性问题。属于一类环境。

室内潮湿环境是指构件表面经常处于结露或湿润状态的环境;露天环境和与土壤或水直接接触的环境,两者都属轻度干湿交替的条件,可能造成钢筋锈蚀。属于二 a 类环境。

干湿交替环境、水位频繁变动环境、严寒和寒冷地区的露天环境与水或土壤直接接触的环境,前者属重度干湿交替条件,后者又加上了冻融循环的影响,耐久性条件比较不利。因此属于二 b 类环境。

严寒和寒冷地区冬季水位变动区环境是干湿交替和冻融循环叠加的双重不利条件。受除冰盐影响环境及海风环境则会引起氯离子侵入混凝土,并造成钢筋锈蚀,耐久性条件更为不利。因此属于三 a 类环境。

盐渍土环境、受除冰盐作用环境、海岸环境,其特点是都会引起氯离子侵入混凝土,并造成钢筋的腐蚀,耐久性条件非常不利。因此属于三 b 类环境。

海水环境及侵蚀性物质直接作用的环境的特点是都有长期、持久的氯离子或其他有害化学介质的侵入,可能会引起混凝土材料性能的劣化及钢筋的腐蚀,耐久性条件极端不利。因此属于四、五类环境。

2.4 应注意的若干问题

(1) 严寒和寒冷地区的划分应符合国家现行标准《民用建筑热工设计规范》(GB50176—93)的有关规定。严寒地区:最冷月平均温度低于或等于 -10°C ,日平均温度低于或等于 5°C 的天数不少于 145d 的地区;寒冷地区:最冷月平均温度高于 -10°C 、低于或等于 0°C ,日平均温度低于或等于 5°C 的天数不少于 90d 且少于 145d 的地区。也可参考该规范附录 8 采用。各地设计人员可根据当地气象台站的气象参数确定所属气候区域,也可根据《建筑气象参数标准》(JGJ35—87)提供的参数确定所属气候区域。

(2) 海岸环境是指海边海水飞沫能够达到的区域,而海风环境是指离岸但海风能够影响的范围。执行时宜考虑主导风向及结构所处迎风、背风部位等因素的影响,根据当地具体情况由调查研究和工程经验确定。

(3) 盐渍土环境是指盐碱土壤中的地基。北方地区冬季往往用除冰盐融解道路结冰,受除冰盐影响环境是指受到除冰盐盐雾影响的环境;受除冰盐作用环境是指能被除冰盐溶液溅射的区域以及使用除冰盐地区的洗车房、停车楼等建筑。直接受到除冰盐溶液浸入的构件(立交桥等)可以按海水环境考虑。

(4) 四类环境(海水环境)可参考现行国家行业标准《港口工程混凝土结构设计规范》(JTJ267—98);五类环境(化学腐蚀)可参考现行国家标准《工业建筑防腐蚀设计规范》(GB50046—2008)。

其他恶劣环境可参考现行国家标准《混凝土结构耐久性设计规范》(GB/T50476—2008)。

3 对混凝土材料的要求(内因)

3.1 混凝土性能劣化的机理

混凝土材料在结构中承受压力,故其质量对结

构性能影响很大。此外,混凝土还起到了保护钢筋的重要作用。钢筋承受全部拉力并改善结构的延性,钢筋失效会引起传力中断、构件解体、结构倒塌的严重后果。因此钢筋生锈和腐蚀一直是混凝土结构之大忌。

混凝土中含有碱性的氢氧化钙,其形成碱性保护膜使钢筋免遭酸性介质的侵蚀(钝化)。但大气中的二氧化碳及酸性介质在水的参与下与其发生化学反应,形成中性的碳酸钙(碳化)。随着时间的推移,碳化逐渐深入到钢筋表面而将其暴露在侵蚀性的环境中(脱钝),从而就可能引起钢筋的腐蚀。因此,混凝土质量及保护层厚度在耐久性中起到极其重要的作用。

3.2 材料的耐久性要求

混凝土的耐久性质量要求包括密实度、抵抗介质作用的钝化性能以及有害介质的含量等,是影响其耐久性的内因。应通过对其材料的耐久性基本要求加以控制。内容有二类、四项,为混凝土的密实度(最大水胶比、最低强度等级)和有害成分的控制(最大氯离子含量、最大碱含量)。对于通常 50 年使用期的混凝土结构,其材料应符合表 2 的规定。

结构混凝土材料的耐久性基本要求 表 2

环境类别	最大水胶比	最低强度等级	最大氯离子含量 /%	最大碱含量 /kg/m ³
—	0.60	C20	0.30	不限制
二 a	0.55	C25	0.20	3.0
二 b	0.50(0.55)	C30(C25)	0.15	
三 a	0.45(0.50)	C35(C30)	0.15	
三 b	0.40	C40	0.10	

3.3 混凝土密实度的要求

混凝土抵抗有害介质入侵的能力取决于其密实度,表现为对最大水胶比和最低强度等级的要求。降低水胶比则含水少孔隙小,对耐久性有利;强度等级高则孔隙率小,对耐久性也有利,表 2 中提出了相应的要求。应该强调的是近年建材方面多向水泥中加入不同的掺合料(矿渣、粉煤灰等),有效胶凝材料的成分、含量不确定性较大,故配合比设计中的水灰比难以反映有效成分的影响。本次修订改用胶凝材料总量作水胶比及各种含量的控制,原规范中的“水灰比”改成“水胶比”,并删去了对于“最小水泥用量”的限制。

最低强度等级的要求反映了密实度,故仍然提出限值的要求。对轻度不利的二类环境中的混凝土结构,当有可靠工程经验时,最低混凝土强度等级可适当降低一个等级。素混凝土构件因无钢筋锈蚀问

题,要求的水胶比及最低强度等级也可适当放松。

3.4 氯离子含量

脱钝以后的钢筋,在有水、氧气的酸性环境中由于电化学反应而生锈,并逐渐发展为腐蚀。试验研究及工程实践均表明:如果存在氯离子,会大大促进电化学反应的速度。最可怕的是氯离子作为催化剂并不会因反应而被消耗,少量氯离子即可造成长久、持续的锈蚀,直至其完全被腐蚀为止。由于氯离子会严重影响混凝土结构的耐久性,必须严加防范。因此,本次修订加严了氯离子含量的限值。表 2 中根据不同的环境类别规定了氯离子占胶凝材料总量的百分比的限量。完全没有氯离子很难做到,例如自来水中加漂白粉就含氯。只要严格限制不使用含功能性氯化物的外加剂(例如含氯化钙的促凝剂等)就不会超出规定的限值。

3.5 碱骨料的影响

一般情况下碱性环境有利于保护钢筋免遭锈蚀,但如碱性浓度太大又长期处于受到水作用的环境中,则就可能引起碱性骨料与水反应体积膨胀,发生碱骨料反应。碱骨料反应会引起混凝土结构的膨胀裂缝,因此要加以控制。但是对于绝大多数一类环境中的房屋混凝土结构,可以不作碱含量限制。只有对于经常处于水作用环境中的土木工程混凝土结构,才应按表 2 考虑碱含量的控制。碱含量的计算方法,可参考协会标准《混凝土碱含量限值标准》(CECS53:93)的规定。

4 增强耐久性的方法(措施)

规范还对一些不利的环境及构件补充提出了一些专门的耐久性技术措施。

4.1 预应力构件

预应力筋的应力很高,直径很小,由于应力腐蚀及氢脆等现象而对耐久性腐蚀比较敏感。而且预应力筋一旦出现问题而导致传力中断,后果不堪设想,因此提出了较严的耐久性要求。首先,预应力构件混凝土中的最大氯离子含量限制为 0.06%,其最低混凝土强度等级也应按表 2 中的规定提高两个等级。此外,还宜采取加大保护厚度、表面防护处理和保证孔道灌浆密实等措施。同时锚固端外露金属部件必须采取有效措施严密封锚,加以保护。

4.2 悬臂构件

悬臂构件根部有最大的弯矩、剪力而很难避免裂缝,且负弯矩裂缝的开口向上。当处在二、三类环境时就难免钢筋腐蚀。由于没有冗余约束,一旦钢筋失效将发生坠落事故。故不宜采用悬臂板的结构形式而宜采用悬臂梁-板,且应在表面增设防护层或

采取其他防护措施。

4.3 抗渗防冻

干湿交替和冻融循环是导致混凝土材料性能劣化的重要原因。对有抗渗、抗冻要求的混凝土,应满足相关专业标准《水工混凝土结构设计规范》(DL/T5057—2009)的要求。此外,采取有效的防水处理和保温-隔热措施,还可以形成局部良好的暴露环境,也有利于结构的耐久性。

试验研究及工程实践均表明,在冻融循环环境中的混凝土如果采用引气剂,则材料中的微小气孔可以大大改善其抗冻性能。因此,北方严寒和寒冷地区处于二 b、三 a 类的采用引气剂抗冻的混凝土,可以适当降低水胶比及强度等级的要求,采用表 2 中括号内的数值。

4.4 外露金属

对于无法避免外露的构件表面金属件,如预埋件、吊环、连接件等,应对内采取措施与构件配筋隔绝,对外的暴露部分采取可靠的防锈措施。

4.5 化学防护

对处在更不利环境中的构件,可以采取更专门的化学防护措施。如在保护层混凝土中掺阻锈剂;采用保护钢筋的表面涂覆处理(环氧树脂或其他涂层);采取阴极保护措施等。

5 非常规结构的耐久性措施

5.1 混凝土结构的长期使用

调查分析表明,国内超过 100 年的混凝土结构不多,但室内正常环境条件下实际使用 70~80 年的房屋建筑混凝土结构大多基本完好。因此在采取适当措施的前提下,一类环境中混凝土结构的实际使用年限达到 100 年是有把握得到保证的。

由于没有足够的科研及工程经验,对非正常环境中使用年限为 100 年的混凝土结构,应采取专门的有效措施,由设计根据具体情况确定。而更长期的使用则目前尚无法考虑。

5.2 百年使用期的技术措施

(1)混凝土的强度等级:提高强度有利于结构耐久,故钢筋混凝土结构的最低强度等级为 C30;预应力混凝土结构的最低强度等级为 C40。

(2)氯离子含量:按预应力构件要求,严格限制为 0.06%。

(3)碱含量:宜使用非碱活性骨料,当使用碱活性骨料时,最大碱含量限制为 $3.0\text{kg}/\text{m}^3$ 。

(4)保护层厚度:考虑碳化速度的规律,混凝土保护层厚度应按正常条件下的 1.4 倍取用;当采取有效的表面防护措施时,保护层厚度可适当减小。

5.3 恶劣环境下的耐久性问题

对有些难以抗拒耐久性侵蚀的情况,还可以专门设计成可更换构件或保护层的形式。制订规则,定期或根据遭受腐蚀的程度及时更换,以避免产生耐久性问题。

5.4 临时建筑

对短期使用临时性建筑的混凝土结构,可以不考虑耐久性问题,不作耐久性设计。

6 使用期的管理

6.1 制度

混凝土结构的耐久性不仅取决于设计和施工,还与使用期的管理有关。像其他许多运行类的装置一样,房屋也应该建立定期检测、维修的制度,并由物业管理部门切实地执行。

6.2 检测

除制度规定的定期检测以外,管理部门还应通过员工观察和用户反映,随时监视结构的受力状态。如混凝土的裂缝、破碎、粉化;钢筋的锈渍、锈蚀和腐蚀等。发现不正常情况应及时反映,必要时应聘请专业人员判断或专门单位检测。

6.3 维护

对投入使用的混凝土结构应结合观察、检查,不间断地维护,包括修补、涂覆、更换等。对于耐久性问题,时间是非常重要的因素。所有的材料劣化都是由表及里发展的,尽早发现并加以处理,可得到事半功倍之效。

6.4 处理

随着时间发展,材料性能劣化是不可避免的。积累到一定程度以后进行处理也是必然的。对表面防护层的维修或更换;设计规定的可更换构件也必须执行替换。这种处理可按制度定期进行,也可根据实际劣化情况按需要随时执行。

7 结语

混凝土结构的耐久性问题是近年才提出的新课题。目前我国尚留存有大量未考虑耐久性设计的既有建筑,大规模基建高潮过去以后,耐久性问题也将提上日程,并可能形成新的产业。根据“四节一环保”的技术政策和可持续发展的国策,历次修订列入了混凝土结构耐久性设计的有关内容,并逐渐丰富、完善。

本次规范修订根据我国的科研调查、工程经验并参考国外标准,耐久性设计内容扩充并加强了可操作性。各国的国情及物候条件不尽相同,且耐久性研究尚需时日,故有关规定还须通过实践补充、完善。本文可供设计人员参考,不确之处望请指正。