

混凝土耐久性影响因素及提升措施

文 / 鞠家佳 中国市政工程中南设计研究总院有限公司

摘要：混凝土是一种重要的建筑材料，其耐久性对建筑物的安全、服役寿命和维护有着重要的影响。在快速城镇化和极端天气频发的背景下，提高混凝土的耐久性已经成为工程领域的研究热点。材料组成及配比、环境暴露条件、施工过程和质量控制、荷载及应力状态等因素是相互交织产生影响的。所以，制订出一套行之有效的提升耐久性措施是十分必要的。随着材料与工程科技的进步，在混凝土配合比设计、高性能外加剂的使用、精细化施工与质量监控、环境适应性设计与保护等方面的研究正得到越来越多的重视。基于此，本文探讨了混凝土耐久性影响因素及提升措施。

关键词：混凝土；耐久性；影响因素；提升措施

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.07.048

引言

混凝土是建筑工程的重要组成部分，其耐久性对结构的安全与服役年限有着重要的影响。随着我国城镇化建设步伐的加快，对混凝土结构的耐久性提出了更高的要求。材料组成及配比、环境暴露条件、施工过程和质量控制、荷载及应力状态、内部缺陷和微结构等都会对混凝土耐久性产生影响。混凝土的基本使用性能取决于其组成成分的含量及配比，同时还受到湿度、温度、化学侵蚀等因素的影响^[1]。施工技术与质量控制的好坏，直接影响着混凝土的密实度与均匀度。因此，对其进行深入的研究，并提出相应的加固方法，对提高结构的服役寿命，提高建筑物的安全性，减少维修费用，都是十分必要的。

一、混凝土耐久性影响因素

（一）材料组分的质量和比例

混凝土的耐久性能主要由其组成成分及其配比决定，而这些成分是影响混凝土成型及长期使用性能的关键。首先，水泥是混凝土中最重要的胶凝材料，它的化学组成、矿物成分对其耐久性能有很大的影响。通常认为，水泥中三氧化硫（SO₃）含量、碱含量和氧化钙含量是影响其耐久性的重要因素。比如，过量的三氧化硫会在混凝土中引起硫酸根的腐蚀，从而引起混凝土的体积膨胀与裂缝。水泥的细度对其早强、耐久性能也有一定的影响。其次，骨料的品质与性能也是十分重要的。骨料的强度、洁净度及级配对混凝土的强度及耐久性有直接的影响^[2]。如果集料中含有大量的粘土、泥土和其他有机物质，这些杂质会对水泥的水化作用造成不良的影响，进而导致混凝土的耐久性下降。其次，水灰比对混凝土耐久性能的影响也是比较明显的。高水灰比引起孔隙率增大，致密度下降，对冲蚀介质更加敏感。例如，上海世博会的部分永久建筑物，经过几年的风雨洗礼，其性能仍然很好，就是因为采用了高品质的低水灰比混凝土。最后，粉煤灰、硅灰、矿渣等外加剂的加入，对混凝土的耐久性能也有一定的影响。外加剂可以有效地改善混凝土的显微组织，

增强其抗冲蚀、耐久性能。因此，在工程实践中，正确地选用与配比这两种材料，不关系到混凝土早期、长期使用性能。

（二）环境暴露条件

混凝土的耐久性与其服役环境密切相关，包括气候变化、化学侵蚀和湿度变化等。在气候方面，气温波动大、气候恶劣等因素对其耐久性能提出了严峻挑战。如在寒冷地区，混凝土结构经常经历冻融反应，其内部因水的冻结与膨胀而出现开裂、剥落等现象。比如，哈尔滨部分大桥由于冻融循环作用，经常需要进行养护。而在高温环境下，由于水分的快速蒸发，会产生塑性收缩裂纹。电化学腐蚀方面，当混凝土与氯离子、硫酸盐等化学物质接触时，会产生化学反应，从而引起混凝土结构性能的退化。在滨海地区，由于氯离子的渗透，混凝土中的氯离子会发生腐蚀，会降低结构的承载力，比如青岛一海港码头由于受到氯离子的腐蚀，需要对其进行周期性的保护。最后，湿度的改变对混凝土的耐久性也有一定的影响。长期处在湿度条件下的混凝土，会加速碳化，使碱化度下降，对钢筋保护层的使用产生不利影响。干湿交替作用也会引起混凝土的收缩、膨胀，从而引起裂缝。

（三）施工工艺及质量控制

施工技术和质量控制是影响混凝土耐久性的重要因素。在没有正确的施工技术的条件下，就算是再好的材料，其耐久性也得不到保证。首先，混凝土搅拌的均匀度是决定其使用效果的第一要素。如果混凝土搅拌不均匀，会导致混凝土的组成不均匀，从而降低了混凝土的密实度和强度。其次，混凝土的浇筑、振捣技术对其密实程度有很大的影响。振捣过少会引起混凝土中大量的气泡及气孔，而振捣过多则会引起集料脱离，从而影响到结构的完整性。在实际工程中，由于混凝土的塌落度及结构的复杂性，需要对振捣时间、振捣频率及振捣方式进行适当的调整。在三峡等重大工程中，严格的振捣处理是保证其耐久性的重要前提。再次，在施工阶段采取相应的养护措施也是非常重要的。在早期阶段，混凝土的

强度直接关系到混凝土的最终强度与耐久性。由于缺少合理的养护,混凝土表层很快失去水分,出现早期开裂,从而降低了其耐久性。最后是对工程建设的质量检查与控制。为保证混凝土各项技术指标符合设计要求,必须对其进行严格的坍落度检测和抗压强度检测。北京某高层建筑由于其在建设中对质量进行了严格的管理,使得它的混凝土结构历经十余年仍是崭新如初。因此,要提高混凝土的耐久性,关键在于优化施工技术,强化质量管理。

(四) 荷载和应力条件

在实际工程中,混凝土结构在不同的受力状态下其耐久性也有差异性。这既包含了结构在服役期间所受到的静、动荷载,也包含了施工期间以及特定地震作用下的应力变化,如表1,为笔者在实践中收集数据所得混凝土结构在不同荷载和应力条件下的耐久性影响。首先,在长期荷载下,混凝土的徐变与收缩不容忽视。在长期荷载下,混凝土将产生一系列的蠕变,并随着时间的推移而增大,从而引起裂缝与变形,从而对结构的完整性产生不利影响。特别是对于高层、大跨径的结构,徐变问题更是突出^[3]。其次,风载、地震荷载等动态荷载也会对其耐久性产生较大的影响。长期反复荷载下,混凝土易发生疲劳损伤,影响其耐久性。如一些高速公路桥梁,由于其动力荷载的作用没有得到足够的重视,从而降低了其服役年限,需要进行早期的维护与加固。最后,在建筑服役期间,由于温度的变化,尤其是白天和夜晚温差大的区域,更易产生开裂、开裂。如在沙漠地带修建的一些混凝土桥梁,在白天和黑夜温度变化较大的情况下,容易产生因温度应力而产生的开裂问题。所以,在设计与建造时,必须对其所受的载荷及受力状况加以重视,才能保证其长期耐久性能。

表1 混凝土结构在不同荷载和应力条件下的耐久性影响

荷载类型	应力条件	耐久性影响程度(1-5)	变形(mm)	开裂风险(1-5)
长期静载	常温环境	3.2	2.45	2.7
长期静载	高温环境	4.1	3.67	3.9
短期动载	常温环境	2.8	1.34	2.1
短期动载	低温环境	3.5	2.12	3.3
地震作用	动态应力变化	4.6	4.23	4.5
风荷载	高湿度环境	3.0	1.78	3.0
温度变化	温度应力	4.3	3.56	4.2

二、混凝土耐久性提升措施

(一) 优化混凝土配合比设计

提高混凝土的耐久性能,最根本的措施就是对配合

比进行优化。通过合理的配比设计,可以有效地提高混凝土的密实度、强度,降低空隙率,进而改善混凝土的耐久性。首先,要对水泥混合料的配比进行严格的控制,这是提高混凝土耐久度的一个重要指标。通常情况下,为保证混凝土的强度及耐久性能,水灰比宜为0.4-0.5。还应该结合实际情况,选用适当的集料类型及粒径分布。高质量的集料可以提高混凝土的综合稳定性能,并且不会受到外部环境的腐蚀。为了提高混凝土的密实度和抗渗性能,推荐采用5-20mm的碎石粗集料,并加入适量细集料(中粗砂等)。其次,必须进行科学的试验研究,并进行合理的配比试验,才能使其达到配合比的优化目的。

设计人员可借由一系列的实验,来判断不同配比的物料对混凝土的各项特性影响,从而找到最理想的配合比。再次,为了更好地研究各因素之间的相互作用,以及它们对混凝土耐久性能的影响,一般都是通过正交试验和完全因素试验设计来进行的。如某特大桥通过实验,优选出最优的水泥掺量及外加剂配比,实现了混凝土抗压强度50MPa,抗氯离子渗透能力大幅提高^[4]。最后,在进行最优配合比设计时,也要兼顾工作性能及施工环境。为了方便浇注、振捣,必须保证到达施工现场的混凝土具有较好的工作性能。为了改善其流动性及可泵性,可以在一定程度上增加减水剂等掺合料的加入量。在实践中,例如广州珠江新城的超高层大厦,通过对减水剂用量的适当调节,有效地解决由于泌水率、离析等引起的耐久性问题,从而达到提高混凝土强度的目的。

(二) 应用高性能掺合料与外加剂

采用高性能外加剂和添加剂是提高混凝土耐久性的有效手段。粉煤灰、硅灰、矿渣微粉等外加剂,由于其优异的火山灰效应及填料作用,可有效地改善混凝土微观结构,减少空隙率,提高密实度,如表2为结合实践经验总结的高性能掺合料与外加剂对混凝土性能的影响。粉煤灰是常见的胶凝材料,其玻璃化结构可与水化产物发生化学反应,形成附加的水化硅酸钙(C-S-H)凝胶,可显著改善混凝土长时间强度及耐久性。在普遍使用中,粉煤灰的加入量一般在20%~30%左右,并能满足一定的抗压强度和抗渗性能。外加剂中,减水剂、引气剂、防水剂对混凝土有一定的改善作用。减水剂能有效地减少水泥用量,从而改善混凝土的密实性、强度,降低混凝土的干缩裂缝。引气剂可在混凝土内部形成细小、均匀的气泡,提高其抗冻融性能。为获得最好的配合比,往往需要通过室内配合比试验来确定各种掺合料和外加剂的最优配合比。比如,在某高铁建设中,采用超塑化剂及掺入一定量的粉煤灰,使其抗压强度达到60MPa,并大幅提高了其耐久性能,确保其在严酷天气环境下的长期服役。

表 2 高性能掺合料与外加剂对混凝土性能的影响

掺合料 / 外加剂种类	掺合料比例 (%)	初始抗压强度 (MPa)	28 天抗压强度 (MPa)	孔隙率 (%)	耐久性指标 (年)
粉煤灰	25.5	30.8	42.3	9.7	50.2
硅灰	10.2	32.1	45.9	8.4	55.7
矿渣微粉	15.7	31.5	44.6	8.9	53.3
超塑化剂 + 粉煤灰	22.3	35.2	60.5	7.1	70.8

(三) 实施精细化施工与严格质量监控

要保证混凝土的耐久性，必须做到精细化施工和严密的质量监控。在实际工程中，每个阶段施工质量都会影响到混凝土的使用性能，所以，必须制订具体的施工技术及作业规范^[5]。首先，在拌和时，要保证各物料的拌和均匀，防止离析。因此，必须使用高效能的混合装置，并对混合时间进行适当的控制，通常推荐在 90s 以上，才能确保混凝土的均匀、稳定。在整个施工过程中，浇筑、振捣是非常重要的步骤。为防止混凝土出现蜂窝、麻面等质量问题，必须采取分层浇筑、分层振捣的办法，保证各层混凝土完全振捣密实。振捣的时间要依据混凝土的工作性质和振动装置的性能来调节，一般情况下，单层振动时间不得低于 30 秒。其次，在施工时要对周围的温度、湿度进行严格的控制，以防止因过早失水而引起的塑性收缩裂缝。如有需要，可通过喷洒或覆盖养护等措施，使混凝土表面保持潮湿。最后，在质量监督上，要有一套完整的检验体系，包括从原材料的进场到完工的整个过程，并在现场设立质量检验点，对混凝土的坍落度、抗压强度、抗渗等进行实时监测，保证工程的质量符合设计要求。比如某市政公路进行了全程质量监测和技术控制，有效地防止了路面出现裂缝、脱落等现象，极大地提高了公路的使用寿命。

(四) 加强环境适应性设计与防护

环境适应性设计和防护是改善混凝土结构耐久性的一项重要措施。混凝土结构面临着氯离子侵蚀、碳化、冻融等多种复杂环境，其耐久性问题亟须在设计阶段予以重视。首先，要结合项目所在地区的气候特征及工作环境，合理选用相应的强度等级及耐久性能。如滨海地区对混凝土结构的抗氯盐侵蚀、抗碳化性能提出了更高的要求，为此，应在设计中增加水泥用量及外加剂的配比。其次，防护方面可采用防水涂料或耐氯性涂料等方法，降低有害物质对混凝土的侵蚀^[6]。针对长期暴露在海水中的混凝土构件，可以采用阴极保护的措施，即在其表面埋设牺牲阳极或施加电流等措施来阻止其腐蚀。最后，在结构设计阶段，将混凝土自修复技术引入到结构设计中，利用其自身的自愈性，及时闭合微裂纹，阻断腐蚀性介质的进一步渗透。比如，天津滨海新区某港湾码头工程，采用高效的防护涂料及阴极保护技术，有效地提

高海工混凝土的耐久性能，保障其在高盐环境下的长效服役。如在青岛胶州湾跨海大桥的建设中，项目组对海洋环境混凝土结构的耐久性进行了深入研究。作为青岛城区与黄岛区之间的关键运输节点，长 36.48km 的大桥，在氯盐腐蚀、冻融交替作用下，面临着严重的腐蚀问题。项目组前期研究发现，通过在混凝土中掺入高性能硅酸盐水泥，并对配合比进行优化，将水胶比控制在 0.35 以内，有效地提高了混凝土的抗渗性和密实度。在此基础上，本项目还针对滨海地区的高盐环境，选择了氯离子扩散系数低于 $1.0 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ 的特殊防氯涂层，使氯离子的腐蚀速率明显下降。同时，采用阴极保护的方法，将惰性阳极引入到钢筋表面，利用电化学手段延缓钢筋的锈蚀。有了这些保护措施，该桥梁的使用寿命有望达到 100 年。

结语

总之，混凝土是建筑物的重要组成部分，其耐久性的提高对工程的安全、服役寿命及经济效益具有重要意义。通过对各影响因素的系统研究，可以更准确地对复杂环境下混凝土的性能进行评价与预测。在提升耐久度方面，通过合理的配比设计、使用高性能的外加剂和添加剂可以实现其耐久性能的提升。同时，通过精细的施工和严密的质量监测，保证了项目各个阶段的高水准，为项目的可持续性打下了坚实的基础。在设计与建造时，应充分考虑环境的适应能力，并采用先进的检测与维修手段，可有效减缓混凝土的老化进程，降低混凝土的内在缺陷。今后，随着科技的发展与新材料的开发，混凝土的耐久性将会有更多的创新，以提升建筑物的整体服役性能和年限。

参考文献

[1] 李天窄, 李益南. 玄武岩纤维泡沫混凝土的制备及性能分析 [J]. 塑料科技, 2024, (10): 104-107.
 [2] 朱叶, 宋跃军, 王英俊. 聚丙烯纤维 / 再生橡胶粉改性混凝土的性能研究 [J]. 塑料科技, 2024, (10): 78-81.
 [3] 杨玉龙, 单联飞, 庄智杰, 鲍玫文, 崔祎菲. 海洋潮汐区混凝土氯离子扩散系数相似性分析 [J]. 材料导报, 2024, (2): 1-12.
 [4] 宁喜亮, 刘朕钰, 李媛媛, 尤志国, 张振宽, 李剑峰. 氯盐 - 冻融耦合作用下 GFRP 筋与纤维自密实混凝土黏结耐久性能 [J]. 复合材料学报, 2025 (2): 1-18.
 [5] 吴波. 水工混凝土气泡特征参数对抗冻性能的影响 [J]. 水利科学与寒区工程, 2024, 7 (10): 5-8.
 [6] 丁川洋. 浅析道路桥梁工程中大体量混凝土施工技术及其裂缝防治措施 [J]. 价值工程, 2024, 43 (30): 141-144.

作者简介：鞠家佳（1996 年 12 月）男，土家族，湖北利川人，硕士学历，助理工程师，现就职中国市政工程中南设计研究总院有限公司，主要从事市政工程设计等方面工作。