

氯化物环境钢筋混凝土的腐蚀和牺牲阳极保护

葛 燕 朱锡昶

(南京水利科学研究院材料结构研究所, 江苏 南京 210029)

摘要 介绍氯化物环境钢筋混凝土腐蚀破坏的基本原理和设计阶段应采取的腐蚀预防措施以及钢筋混凝土结构阴极保护和电化学脱盐防腐蚀技术. 电弧喷锌或电弧喷铝-锌-铝合金、锌箔/导电黏结剂、锌网/水泥浆护套、锌网/压板和埋入式等牺牲阳极保护系统是国外近 20 年来研究开发的能够有效控制氯化物环境钢筋混凝土腐蚀的牺牲阳极保护系统. 与外加电流阴极保护相比, 牺牲阳极保护具有安装简便、在运行过程中不需要维护管理、保护效果可靠等优点, 并能用于预应力钢筋混凝土结构, 不存在氢脆危险.

关键词 氯化物 钢筋混凝土 腐蚀 牺牲阳极 阴极保护

中图分类号: TU375

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2005)04-0067-04

Corrosion and sacrificial anode cathodic protection of reinforced concrete in chloride environment//GE Yan, ZHU Xi-chang(Materials and Structural Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract : An introduction was given to the basic principle of corrosion of reinforced concrete in chloride environment, as well as the anti-corrosion measures that should be considered in design stage and anti-corrosion techniques of cathodic protection and electrochemical chloride extraction from reinforced concrete. It has been proved that the sacrificial anode cathodic protection systems including arc-sprayed zinc or arc-sprayed Al-Zn-In alloy, zinc foil/conductive adhesion agent, zinc mesh/grout jacket, zinc mesh/compression panels, and embeded sacrificial anode, which were developed in foreign countries in recent 20 years, could effectively control corrosion of reinforced concrete in chloride environment. Without requirement of maintenance and management during the operation process, the sacrificial anode cathodic protection systems are simple in installation and have reliable effect as compared with the impressed current cathodic protection. Moreover, the sacrificial anode cathodic protection systems can be applied to prestressed reinforced concrete structure without leading to hydrogen embrittlement.

Key words : chloride; reinforced concrete; corrosion; sacrificial anode; cathodic protection

钢筋混凝土结构物的设计使用寿命一般为几十年. 在海洋和使用除冰盐等含有氯化物的环境中, 很多结构物如采油平台、码头、大桥及海岸建筑物等, 往往在远远小于设计使用寿命的情况下就出现了严重的钢筋混凝土腐蚀破坏, 需要维护甚至报废, 由此造成的损失是十分巨大的. 大量的研究和实践证明, 钢筋腐蚀是造成氯化物环境钢筋混凝土破坏的重要原因.

美国、英国、荷兰、日本这些海岸工程较多且技术较为先进的国家在 20 世纪 90 年代初期所做调查资料表明, 处于浪溅区的钢筋混凝土桩基建筑物, 大多使用不到 20 年即发生严重的钢筋腐蚀, 混凝土剥裂, 不得不耗巨资进行修复. 如, 美国 1990 年有待修补的钢筋混凝土桥梁和码头的维修费用达 1 550 亿美元, 英国 1972 年建成的某钢筋混凝土桥梁, 由于钢筋严重腐蚀, 18 年所耗维修费高达原总建造费的

1.6 倍^[1]. 美国佛罗里达 1 900 km 海岸线有 3 000 座桥梁的下部结构在建成以后的 12 ~ 15 年就需要维修, 估计每年要化 3 000 ~ 5 000 万美元进行维修^[2].

如何有效防止氯化物环境钢筋混凝土的腐蚀破坏, 确保其在设计使用寿命期间安全正常运行, 降低维修和维护费用, 是当今世界普遍关注的重要研究课题.

1 氯化物环境钢筋混凝土的腐蚀

正常情况下钢筋周围混凝土为高碱性, 钢筋表面会形成一层致密的钝化膜, 它对钢筋具有很强的保护能力, 使得钢筋不遭受腐蚀. 而在氯化物环境中, 具有极强穿透能力的氯离子会透过混凝土毛细孔到达钢筋表面, 当钢筋周围混凝土液相中的氯离子含量达到临界值时, 钢筋钝化膜就会局部破坏. 只要造成腐蚀的其他必要条件已经具备(主要指维持钢筋腐蚀所需要的水与氧), 钢筋就会发生严重的电

化学腐蚀,导致混凝土结构性能的劣化,如混凝土顺钢筋开裂、“握裹力”下降与丧失、钢筋断面损失以及钢筋应力腐蚀断裂等。

海洋环境中的钢筋混凝土结构物通常处于直接暴露和间接暴露两种环境。直接暴露环境的结构物包括部分或全部浸泡在海水中的钢筋混凝土结构物,如采油平台、码头、防波堤、海上大桥等。部分浸泡在海水中的钢筋混凝土结构物,根据腐蚀程度的不同分为4个区域:水下区、水位变动区、浪溅区和大气区。浪溅区是腐蚀最为严重的区域,这是因为结构物在高潮时被海浪溅湿,低潮时水分蒸发,混凝土表层孔隙液中的氯离子浓度增高,并不断向混凝土内扩散,使钢筋周围孔隙液的氯离子浓度较易增大到破坏钢筋钝化膜的临界浓度,同时又处于含盐雾潮湿大气中,混凝土具有足够湿度而又不饱水,具备钢筋腐蚀所必需的条件。水下区饱水混凝土由于缺氧,阴极反应困难而腐蚀较轻。

间接暴露环境的结构物包括那些沿海岸线建造的不与海水直接接触的钢筋混凝土结构物,如公路、大桥、停车场、多层公寓。对于这类结构物,混凝土的密实度和保护层厚度在阻止氯离子侵入和钢筋腐蚀开始发生的时间上起着重要的作用。

2 控制氯化物环境钢筋混凝土腐蚀的方法

对新建的钢筋混凝土结构物,在设计阶段根据环境的腐蚀性采取有效的措施预防或延缓腐蚀的发生非常重要。这些措施主要包括:加大混凝土保护层厚度,采用高性能混凝土提高混凝土的密实性,降低氯离子的渗透速度,采取防腐蚀措施,包括混凝土表面涂层,混凝土硅烷浸渍,混凝土中掺加钢筋阻锈剂,混凝土中掺加或在混凝土表面涂抹水泥基渗透结晶型抗氯离子渗透材料,采用环氧涂层钢筋,采取阴极防护措施(即对新建结构物的钢筋混凝土结构进行阴极保护)等^[3,4]。

对已经发生腐蚀破坏的已建钢筋混凝土结构物,传统的维修方法是局部修补,即在混凝土的破坏部位凿除胀裂、剥落的混凝土,露出其中的钢筋并进行处理,再用新的优质混凝土或聚合物改性水泥砂浆修补恢复其原貌。在氯化物环境中,这种方法往往效果很差或是无效,因为老混凝土中的钢筋和修补混凝土中的钢筋形成了新的腐蚀电池,加速了老混凝土中钢筋的腐蚀,结果造成修补混凝土周围的老混凝土很快被破坏。这种现象通常称为“环阳极腐蚀”或“光环效应”。

阴极保护和电化学脱盐是国外近几十年来开发的控制氯化物环境混凝土中钢筋腐蚀的电化学方法。

阴极保护通过向被保护的金属表面通入足够的阴极电流,使其阴极极化以减小或防止金属的腐蚀。国外近30多年的研究实践证明,不论混凝土中的氯化物含量如何,阴极保护是有效控制氯化物环境混凝土中钢筋腐蚀的方法。

实施阴极保护可以通过外加电流和牺牲阳极两种方式。外加电流阴极保护系统的优点是保护电流可调,不受混凝土电阻率的限制,缺点是保护系统在运行过程中需要维护管理,可能产生过保护等。目前在发达国家,外加电流阴极保护在氯化物环境钢筋混凝土结构中广泛应用,保护效果显著。牺牲阳极保护由于提供的保护电流有限,起初认为不适合钢筋混凝土结构的保护,但由于牺牲阳极保护具有保护系统安装简便,在运行过程中不必经常维护管理,不会造成过保护等优点,因此20世纪80年代后,国外开展了大量的氯化物环境钢筋混凝土结构牺牲阳极保护试验研究,研制开发的牺牲阳极保护系统主要有电弧喷锌或电弧喷铝-锌-铝合金、锌箔/导电黏结剂、锌网/水泥浆护套、锌网/压板、埋入式等牺牲阳极保护系统,这些系统已在高速公路桥面板和桥墩、海港码头的梁板和桩、停车场面板等结构上实际应用,取得了大量的实验数据和现场实际应用经验。与外加电流阴极保护相比,牺牲阳极保护另一个重要优点是可以在预应力钢筋混凝土结构中使用,不存在氢脆危险。

电化学脱盐以混凝土中的钢筋为阴极,临时安装在混凝土表面电解质中的电极为辅助阳极,在阴极和辅助阳极之间通直流电流,混凝土中氯离子不断向辅助阳极迁移,从而从混凝土中除去氯化物,使混凝土中的氯化物浓度降低到足以阻止钢筋腐蚀。这种方法被认为最适用于被氯化物污染但尚未引起严重破坏的结构,因为它可以不必广泛地清除和更换已受氯化物污染的混凝土,具有较高的经济、技术价值。

3 钢筋混凝土牺牲阳极保护系统

3.1 电弧喷锌或电弧喷铝-锌-铝合金牺牲阳极保护系统

该系统采用电弧喷涂技术将锌丝或铝-锌-合金金丝直接喷涂在清理过的钢筋和混凝土表面,形成喷金属涂层,以此来保护钢筋混凝土结构。

20世纪80年代末期,美国佛罗里达运输部开发了电弧喷锌牺牲阳极保护系统,1988年在佛罗里达 Niles Channel 桥的下部结构上进行了现场试验。4年以后保护系统仍然正常工作,试验获得成功。此后,佛罗里达南部热带海洋环境中的钢筋混凝土结构有半数使用了电弧喷锌牺牲阳极保护系统。研究

发现,作为牺牲阳极的纯金属锌的性能受阳极和混凝土界面湿度的影响很大,在浪溅区以上混凝土干燥的部位,锌阳极的发生电流随时间延长而大大降低,从而导致钢筋的保护电流不足^[2,5]。

1994年,美国联邦公路管理局资助开展了新型牺牲阳极材料的研究,开发了电弧喷铝-锌-镉合金牺牲阳极保护系统,喷涂层的组成为80%铝,20%锌,0.2%镉。1996年,在Bryant Patton桥进行了电弧喷锌和电弧喷铝-锌-镉合金牺牲阳极保护现场试验,并进行了2年的监测。研究结果表明,铝-锌-镉合金阳极的输出电流比纯锌阳极明显提高,即使在温度和湿度较低的情况下也是如此。铝-锌-镉喷涂层与混凝土的黏结性能与锌喷涂层相同,但外观比锌喷涂层好。此后,在多座桥梁的混凝土桩和预应力混凝土梁上都成功实施了电弧喷铝-锌-镉牺牲阳极保护,如宾夕法尼亚州费城的Walt Whitman桥、维吉尼亚州诺福克的Willoughby Bay桥、得克萨斯州加尔维斯敦的San Luis Pass桥等^[6,7]。

电弧喷锌或电弧喷铝-锌-镉合金牺牲阳极保护系统主要用于浪溅区和大气区钢筋混凝土结构,预计系统的使用寿命为10年。

3.2 锌箔/导电黏结剂牺牲阳极保护系统

该系统通过事先涂刷在锌箔一侧的导电黏结剂,将0.25mm厚的锌箔粘贴在清理过的干燥混凝土表面来保护钢筋混凝土结构。

1992年,美国联邦公路管理局研究成功了锌箔/水凝胶牺牲阳极保护系统,1994年美国3M公司研制了具有良好导电性能和黏结性能的水凝胶黏结剂。1995年,在佛罗里达Ft. Pierce的桥墩上安装了第一个锌箔/导电黏结剂牺牲阳极保护系统,面积约为100m²,3年后保护系统仍然运行良好。

锌箔/导电黏结剂牺牲阳极保护系统安装十分简单,不需要专门的设备和专业的技术人员。美国已在沿佛罗里达海岸的几座桥梁的下部结构和多层公寓的阳台中使用,短期试验效果良好^[8,10]。

锌箔/导电黏结剂牺牲阳极保护系统主要用于浪溅区和大气区钢筋混凝土结构,系统的长期使用寿命还有待于进一步的验证。

3.3 锌网/水泥浆护套牺牲阳极保护系统

该系统将锌网套固定在一个玻璃钢套中,将玻璃钢套包裹在混凝土桩或墩的周围,再在玻璃钢套和混凝土之间填满水泥砂浆,以此形成一个牺牲阳极保护系统。另外在水中安装一个大阳极,一方面为水中钢

筋混凝土结构提供保护,另一方面在海水涨潮时可以减少锌网阳极的输出电流,延长其使用寿命。

1994年,美国佛罗里达运输部首先开展了锌网/水泥浆护套牺牲阳极保护系统的试验研究,并在佛罗里达克逊维尔的Broward河桥的钢筋混凝土桩上进行了现场试验,获得成功。现在该技术已经成为佛罗里达运输部修复海洋环境钢筋混凝土桩的标准方法,已在26个州的桥梁上安装该系统,保护了700余根桩,而在全世界已有4000多个成功安装的实例^[9]。

锌网/水泥浆护套牺牲阳极保护系统主要用于保护水位变动区和浪溅区钢筋混凝土桩和墩,同时具有防腐保护和混凝土修复双重作用。它的特点是系统安装简单,使用寿命可在20年以上。

3.4 锌网/压板牺牲阳极保护系统

该系统将锌网固定在清理过的桩表面,用带沟槽的压板将其压紧,再用不锈钢带将压板固定好,以此形成一个牺牲阳极保护系统。压板用再生塑料和纸产品制成,水可以通过压板的沟槽在锌网和混凝土之间流动。

该系统是专门为混凝土方桩设计的,已被佛罗里达运输部广泛应用于水位变动区和浪溅区钢筋混凝土方桩的腐蚀控制^[10]。

3.5 埋入式牺牲阳极保护系统

该系统由改进的锌阳极和水泥胶合材料组成。在对钢筋混凝土结构进行局部修补时安装这种牺牲阳极保护系统可以消除环阳极腐蚀效应,大大延长结构物维修后的使用寿命。

1994年,英国的阿斯顿大学最早开展了该系统的研究并将其进一步发展。英国Fosroc国际有限公司和加拿大马尼托巴湖Vector Onstruction Group共同开发研制了可供市售的Galvashield埋入式牺牲阳极专利产品,实现了这一研究成果在现场的应用。目前在国外,钢筋混凝土结构维修时安装埋入式牺牲阳极保护系统的工程从小的厂房和停车场到大的公路桥预应力混凝土梁、板以及沿海建筑物等都有。如,1999年美国内布拉斯加州Omaha桥墩的修复,1999年美国北达科他州Minot高架桥下部结构的修复,1999年加拿大魁北克省魁北克市桥墩、面板、胸墙的修复,1999年加拿大安大略省Renfrew桥胸墙的修复,1999年加拿大马尼托巴湖省温尼伯湖市预应力混凝土梁的修复等^[11]。

3.6 工程费用

1999年,美国维吉尼亚运输研究委员会和联邦

① Dykstra B G, Wehling J E, Piazza II J L. Cathodic protection of steel reinforced concrete structures using a galvanic zinc hydrogel system. CORROSION 2002, NACE International, Houston 2002.

公路管理局联合发布了最终研究报告^[10],介绍了在维吉尼亚预应力混凝土桩试验的4种牺牲阳极保护系统工程费用的估算结果,见表^[10].

表 1 4 种牺牲阳极保护系统工程费用 美元/m ²		
保护系统类型	材料费	安装费
电弧喷铝-锌-钢	29.60	78.40~99.40
锌箔/导电黏结剂	63.51	44.49~65.49
锌网/水泥浆护套	209.75(860 美元/根)	400.25(1640 美元/根)
锌网/压板	195.10(800 美元/根)	402.90(1650 美元/根)

4 结 语

氯化物环境钢筋混凝土结构物在未达到设计使用年限的情况下过早腐蚀破坏造成的经济损失是十分巨大的.氯化物引起钢筋腐蚀是造成钢筋混凝土结构破坏最主要的原因.为有效控制钢筋混凝土的腐蚀,延长其使用寿命,应在设计阶段采取有效的腐蚀预防措施和对已建结构物采取有效的腐蚀控制措施.

20 世纪 80 年代后,发达国家开发研制了多种牺牲阳极保护系统用于氯化物环境钢筋混凝土结构的腐蚀控制.牺牲阳极保护系统具有安装简便,在运行过程中不需要维护管理,保护效果可靠等优点,而且能够用于预应力钢筋混凝土结构.目前,我国牺牲阳极保护技术已被广泛应用于钢结构的防腐蚀,而在钢筋混凝土结构上的应用尚属空白,与国外的差距较大,尽早开展钢筋混凝土牺牲阳极保护技术的研究是十分必要和迫切的.

参考文献:

[1] 梁逢伍.大型钢筋混凝土桩基码头耐久性研究[J].水运工程,2003(12):23—26.

[2] Kessler R. Zinc anode coating protects coastal bridges[R]. FHWA-SA-96-045, Federal Highway Administration, Washington DC, 1996.

[3] 洪定海.混凝土中钢筋的腐蚀与保护[M].北京:中国铁道出版社,1998.81—142.

[4] Tettamanti M, Rossini A. Cathodic prevention and protection of concrete elements at the sydney opera house[J]. Material Performance, 1997, 36(9):21—25.

[5] Sagues A A, Power R G. Sprayed-zinc sacrificial anodes for reinforced concrete in marine service[J]. Corrosion, 1996, 52(7):508—522.

[6] Daily S F. Galvanic cathodic protection of reinforced and prestressed concrete using a thermally sprayed aluminum coating[J]. Concrete Repair Bulletin, 2003, 16(4):12—15.

[7] 王伟, 季明堂.钢筋混凝土构筑物牺牲阳极保护研究进展[J].科学视野, 2001, 25(5):18—20.

[8] Bennett J E, Shue T J. Galvanic cathodic protection of reinforced concrete bridge members using sacrificial anodes attached by conductive adhesives[R]. FHWA-RD-96-073, Federal Highway

Administration, Washington DC, 1996.

[9] Leng D L. Zinc mesh cathodic protection systems[J]. Material Performance, 2000, 39(8):28—33.

[10] Clemeña G G, Jackson D R. Evaluation of anodes for galvanic cathodic prevention of steel corrosion in prestressed concrete piles in marine environments in virginia[R]. VTRC Report No.00-R3, Virginia Transportation Research Council, 1999.

[11] Page C L, Sergi G. Developments in cathodic protection applied to reinforced concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2000, 12(1):8—15.

(收稿日期 2004-05-18 编辑:熊水斌)

(上接第 66 页)

[25] 李永和, 葛润修.在役钢筋混凝土结构三维锈蚀层面模型与数值分析[J].中国科学(E 辑), 2002, 32(5):653—661.

[26] Al-Sulaimani G J, Kaleemullah M, Basunbul I A. Influence of corrosion and cracking on bond behavior and strength of reinforced concrete member[J]. ACI Structural Journal, 1990, 87(2):220—231.

[27] Abrishami H H, Mitchell D. Analysis of bond stress distributions in pullout specimens[J]. Journal of Structural Engineering, 1996, 122(3):255—261.

[28] 潘振华, 牛荻涛, 王庆霖.锈蚀率与极限粘结强度关系的试验研究[J].工业建筑, 2000, 30(5):10—12.

[29] 张伟平, 张誉.锈胀开裂后钢筋混凝土粘结滑移本构关系研究[J].土木工程学报, 2001, 34(5):40—43.

[30] 赵羽习, 金伟良.钢筋与混凝土粘结本构关系的试验研究[J].建筑结构学报, 2002, 23(1):32—37.

[31] 卢木.基于耐久性评定的钢筋混凝土结构的剩余寿命预测[J].建筑科学, 1999, 15(2):23—28.

[32] 袁群, 赵国藩.老化钢筋混凝土结构的分形性质分析[J].水利学报, 2000(12):21—25.

[33] 赵鹏飞, 王娟明.模糊数学在混凝土构件耐久性评定中的应用初探[J].工业建筑, 1997, 27(5):7—10.

[34] 徐力, 杨小平, 刘荣桂, 等.预应力结构设计使用寿命模型[J].江苏大学学报(自然科学版), 2002, 23(1):71—74.

[35] 惠云玲.混凝土结构钢筋锈蚀耐久性损伤评估及寿命预测方法[J].工业建筑, 1997, 27(6):19—22.

[36] Liu Y P, Weyers R E. Modeling the time-to-corrosion cracking in chloride contaminated reinforced concrete structures[J]. ACI Materials Journal, 1998, 95(6):675—681.

[37] Li C Q. Life-cycle modeling of corrosion affected concrete structures:propagation[J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(6):753—761.

[38] Enright M P, Frangopol D M. Service-life prediction of deteriorating concrete bridges[J]. Journal of Structural Engineering, 1998, 124(3):309—317.

[39] 赵尚传, 赵国藩, 贡金鑫.混凝土结构基于可靠度和优化理论剩余寿命分析[J].工业建筑, 2002, 32(4):37—39.

(收稿日期 2004-06-10 编辑:熊水斌)