

# 上海东海大桥桩基础防腐蚀方案比选

卢永成

(上海市市政工程设计研究院, 上海 200092)

**摘要:**上海东海大桥工程全长 32.5 km, 是国内第一座特大型跨海桥梁。大桥设计使用寿命 100 a。大桥桩基础采用 PHC 管桩、钢管桩、钻孔灌注桩三种形式, 为了达到受海洋环境的腐蚀下的设计使用寿命, 减少后期维修费用, 对各种桩型分别进行防腐蚀方案的论述与比选, 以确定较合适的防腐蚀措施。

**关键词:**东海大桥; 跨海大桥; 桩基础; 防腐蚀; 方案; 上海市

**中图分类号:** U443.15 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-7716(2006)01-0029-03

## 1 概况

东海大桥位于杭州湾北部海域, 起始南汇芦潮港地区至小洋山港区一期交接点, 全长约 32.5 km。

该工程的主要地质条件为冲积层软土地基, 桩基础是最经济、适用的基础形式。桩基型式主要有:  $\Phi 1.2$  m PHC 管桩、 $\Phi 1.5$  m 钢管桩、 $\Phi 1.6$  m~2.5 m 钻孔灌注桩三种。该工程基础规模宏大, 其中: PHC 管桩有 370 多根; 钢管桩有 5300 多根; 钻孔灌注桩有近 700 根。

桩基础采用的材料主要为混凝土与钢材, 这些材料受海洋环境的腐蚀造成的危害性极大, 且检查、维护等工作难度大, 费用高。为了达到 100 a 的设计使用寿命, 有必要对各种桩型分别进行防腐蚀方案比选, 以确定较合适的防腐蚀措施。

## 2 PHC 管桩防腐蚀

PHC 管桩是先张法工艺施工的预应力混凝土管桩。管桩的分节预制长度一般为 15~30 m, 根据设计桩长再拼接成整桩。

PHC 管桩本身的混凝土密实性均较好(水灰比不大于 0.35), 强度也比较高, 标号达 C80。但 PHC 管桩投入生产、使用的时间不长, 尤其在海洋工程中应用不多, 还未能找到实际使用寿命的工程实例。

威胁混凝土结构的最主要形式是氯化物导致的钢筋腐蚀。PHC 管桩最外层箍筋的保护层厚度为 5 cm, 为薄壁混凝土结构, 其耐久性须谨慎对待。

下面从提高混凝土的自身性能和辅助防腐蚀措施二方面来阐述 PHC 管桩的防腐蚀措施。

## 2.1 混凝土自身性能

通过采用高性能混凝土提高混凝土的密实性, 实现大桥防腐目的的思路, 结合大桥桥区的环境特点设计了两种高性能混凝土方案。

(1) 高性能混凝土 A: 掺加矿渣微粉和粉煤灰为主的优质矿物掺和料。(2) 高性能混凝土 B: 掺加微硅粉和矿渣微粉及粉煤灰。

两种高性能混凝土的控制指标均以强度等级作为基本控制指标, 以耐久性(如抗氯离子渗透的电通量指标等)作为主要控制指标(表 1)。

表 1 PHC 管桩混凝土的控制指标

混凝土拌和物		硬化混凝土	
水胶比	胶凝物质总量 (kg/m <sup>3</sup> )	强度等级	抗氯离子渗透性 电通量(C)
$\leq 0.35$	$\geq 400$	C80	$\leq 600$

## 2.2 辅助措施

由于 PHC 管桩自身结构及生产工艺的限制, 靠增加混凝土保护层厚度以进一步提高桩的防腐能力较难实现, 而且 PHC 管桩为预应力结构不宜采用涂层钢筋和阴极保护, 因此辅助措施考虑在桩体外侧采用隔离保护或包覆耐腐蚀的材料等来提高桩的耐腐蚀性能。在该工程中考虑如下方案:

### 2.2.1 方案一: 桩基混凝土表面包覆防腐材料

PHC 管桩在泥面以上部分的外露表面包覆玻璃钢(纤维增强复合材料)增加其防腐性能, 从而延长其使用年限, 该措施还可解决 PHC 桩的接头部位的防腐问题。

PHC 管桩外表面包覆玻璃钢厚度取 2.5 mm, 包覆范围从承台底至冲刷泥面下 2 m, 这一措施不仅延缓氯离子向混凝土内部扩散的进程, 也可阻止海水浸入沉桩时可能出现的微裂缝而引起的腐蚀。

在嵌固点以上桩内布设钢筋笼, 并灌注混凝土, 以对沉桩应力、桥梁运营应力较大的部位及桩与承

收稿日期: 2005-04-01

作者简介: 卢永成(1965-), 男, 上海人, 高级工程师, 副总工程师, 从事桥梁工程设计工作。

台的连接部位进行必要加强。

经理论计算分析,采用高性能混凝土的PHC管桩箍筋锈蚀诱导期54 a,箍筋锈蚀扩散期32 a,包覆玻璃钢的保护效果为40 a,合计使用年限126 a。这样,PHC桩在理论上可以满足100 a使用寿命的要求。

### 2.2.2 方案二:桩体混凝土表面涂防腐涂料

常用的防腐涂料使用年限较短,通常为10~20 a,而对水位变动区进行大规模重新涂装也比较困难。据介绍,美国生产的聚氨酯类涂料(XTW系列涂料),其设计年限在75 a以上。该类涂料在美国圣马特奥大桥工程中已使用了300多万平方米。因此方案二的涂料暂考虑采用XTW系列涂料。

XTW系列涂料设计使用寿命按50 a计,采用高性能混凝土制作的PHC管桩使用年限86 a,累计使用年限136 a,可满足100 a使用寿命的要求。

### 2.2.3 方案三:混凝土管桩外套钢套管

采用从桩顶到水下区上部一定范围内(5 m) PHC管桩的外侧套一直径1300 mm、壁厚14 mm的钢管,保证钢管壁与PHC桩壁之间有30 mm以上的空隙,在空隙内高压灌注掺有阻锈剂的微膨胀砂浆。钢管不参与结构受力,仅作防腐屏障。钢管外壁除锈并涂覆使用寿命达15 a以上的涂料。防腐涂料的保护年限、钢管的保护年限及混凝土桩的自身使用年限累计,在理论上是可以满足100 a使用寿命的要求。

### 2.2.4 方案四:PHC管桩上接钢管桩

水位变动区采用钢管桩替代PHC管桩,钢管桩直径也为1.2 m。钢管桩与PHC管桩的连接处采用加强钢板焊接牢固,桩内灌注钢筋混凝土至嵌固点。钢管桩长度为5 m。钢管桩的防腐措施推荐采用热喷铝金属涂层(250  $\mu\text{m}$ ) + 封闭涂料 + 重防腐涂料,预留钢管腐蚀量,可以满足100 a使用寿命的要求。

经表2综合比较,方案一对工程的适应性较好,技术成熟,且工程投资较低,因此,推荐辅助措施采用方案一。

## 3 钢管桩防腐蚀

钢材在海洋环境下抗电化学防腐性能是极其脆弱的,必须采取防腐措施才能达到设计使用年限的要求。钢材年平均腐蚀速度见表3。

钢管桩主要防腐措施如下:

(1) 机械隔离:采用某种材料包覆在钢结构表

表2 PHC管桩防腐方案比较表

方案号	主要技术措施	技术优缺点比较	经济指标
方案一	包覆玻璃钢,玻璃钢管使用寿命40 a,加上混凝土桩自身的寿命	玻璃钢管使用寿命40 a,加上混凝土桩自身的寿命	约170元/m <sup>2</sup>
方案二	桩体外表面涂防腐涂料	XTW系列涂料的性能尚需进一步试验与核实。缺点:沉桩不到位,影响较大,否则需要增加涂装范围,增加工程投入。	约255元/m <sup>2</sup>
方案三	外套钢管套,在施工工艺及质量有保证的前提下,防腐效果是可靠的。缺PHC桩之间点:施工工艺较复杂,经验较少,投资较大。	在施工工艺及质量有保证的前提下,防腐效果是可靠的。缺PHC桩之间点:施工工艺较复杂,经验较少,投资较大。	约570元/m <sup>2</sup>
方案四	PHC桩顶接钢管桩	钢管桩与PHC桩连接构造比较复杂,尚无实际工程经验,投资较大。	约720元/m <sup>2</sup>

表3 海洋环境中钢材平均腐蚀速度

部位	V(mm/a)
大气区	0.05~0.10
浪溅区	0.20~0.50
水位变动区、水下区	0.12~0.20
泥下区	0.05

面,使之与海水、氧气等产生腐蚀的物质隔离以达到防腐的目的。通常采用有着良好附着性、耐腐蚀性、抗渗性的材料,如氯化橡胶、丙烯酸、聚氨酯、环氧粉末、环氧沥青等。另外用树脂与玻璃丝布交替涂刷、缠绕在钢结构表面、或采用聚乙烯材料包覆在钢结构表面亦可达到防腐的目的。

(2) 金属喷涂隔离:该措施是采用火焰喷涂方法或电弧喷涂方法将熔融金属锌、铝或其合金喷射到处理后的钢结构表面,金属涂层一方面对结构起到机械封闭作用,另一方面也起到局部牺牲阳极的保护作用。

(3) 阴极保护:是根据腐蚀微电池原理人为提高待保护材料电位来达到保护目的。阴极保护措施一般适用于水下部位,对水位变动区也有一定的保护作用。阴极保护手段分为牺牲阳极阴极保护法和外加电流阴极保护法。

该工程比选了如下三个方案:

方案一:

水位变动区包覆纤维增强复合层设计使用寿命按40 a计,钢材腐蚀速度在考虑阴极保护的作用下(保护效率按40%)不超过0.12 mm/a,60 a腐蚀量为7.2 mm,钢管桩计算壁厚为18 mm(钢板厚度25 mm),可以满足耐久性要求。

水下区重防腐涂层系统使用寿命按10 a计,

钢材腐蚀速度在考虑阴极保护的作用下(保护效率按80%)不超过0.04 mm/a, 90 a腐蚀量为3.6 mm。

泥下区钢材腐蚀速度在考虑阴极保护作用下(保护效率按80%)不超过0.01 mm/a, 100 a腐蚀量为1.0 mm。

另采取桩内填充钢筋混凝土作为补充措施, 以提高桩基使用的耐久性。另经比较计算, 填充混凝土的钢管桩与未填充混凝土的钢管桩相比, 承台的最大位移可减小45%, 同时, 钢管桩防船舶撞击安全性能也能得到提高。

#### 方案二:

对钢桩采用电弧喷铝(260  $\mu\text{m}$ ) + 玻璃钢被覆层(2000  $\mu\text{m}$ ) + 封闭面漆涂层(超厚环氧沥青400  $\mu\text{m}$ )的联合防腐方法。

钢管桩喷砂除锈后进行电弧喷涂铝合金涂层260  $\mu\text{m}$ , 使用寿命大于20 a, 铝涂层与钢桩之间具有很高的涂层结合力; 铝涂层均匀覆盖在钢桩表面, 在海洋大气、潮差和海水环境下牺牲阳极保护电流辐射距离短, 保护效果充分; 铝涂层自腐蚀速率低, 从而表现防腐蚀寿命长久; 玻璃钢树脂(如不饱和树脂)直接涂装在喷铝表面, 玻璃纤维丝布与玻璃钢树脂交替涂敷, 形成五油四布的玻璃钢防腐涂层, 它一方面具有相当长的防腐蚀寿命, 约40 a; 另一方面它推迟铝涂层与海洋腐蚀环境接触时间, 从而推迟铝涂层的自腐蚀和阴极保护发生时间, 并具有最佳协同效应; 封闭环境沥青面涂具有耐大气和耐海水及其冲刷性能。

60 a后需外加铝合金牺牲阳极保护, 约20 a一次, 共二次, 使结构达到100 a使用寿命。

#### 方案三:

水位变动区采取高效铝合金牺牲阳极的阴极保护法 + 重防护涂层 + 桩内混凝土填芯 + 预留钢管桩腐蚀量的联合防腐方法。阳极块使用寿命大于35 a, 施工期临时阳极块使用寿命大于2 a; 重防护涂层: 725-H53-9 环氧重防腐涂料, 涂层厚度1100  $\mu\text{m}$ , 10 a; 桩内混凝土填芯, 桩顶7 m长范围; 预留钢管桩腐蚀量为7 mm。

水中及泥土区采取高效铝合金牺牲阳极的阴极保护法 + 预留钢管桩腐蚀量的联合防腐方法。阳极块使用寿命大于35 a, 施工期临时阳极块使用寿命大于2 a; 预留钢管桩腐蚀量(表4)。

综合技术、经济、施工操作性等方面比较: 方案二操作要求高, 受沉桩不到位影响很大, 否则, 需增

表4 钢管桩防腐方案比较表

方案号	主要技术措施	技术优缺点比较	全寿命经济指标
方案一	水位变动区: 牺牲阳极的阴极保护法(35 a更换) + 玻璃钢被覆层(40 a) + 预留腐蚀量(腐蚀速度0.12 mm/a, 60 a需7.2 mm以上)。更换阳极块; 水中及泥土区: 海工防腐涂层(250 $\mu\text{m}$ , 寿命10 a) + 阴极保护(35 a更换) + 预留腐蚀量(腐蚀速度0.04 mm/a, 90 a需3.6 mm以上)	有成熟施工经验; 阳极块寿命35 a, 100 a需二次; 更换阳极块; 工艺较多, 可操作性稍差	约230元/m <sup>2</sup>
方案二	水位变动区: 电弧喷铝(20 a) + 玻璃钢被覆层(40 a) + 封闭面漆涂层(超厚环氧沥青400 $\mu\text{m}$ )。水下区: 电弧喷铝(20 a) + 玻璃钢被覆层(40 a)。泥下区: 预留腐蚀量(腐蚀速度0.04 mm/a, 90 a需3.6 mm以上)。	有成熟施工经验; 以后维修, 可外加阳极, 约20 a一次, 共二次; 施工相对较复杂; 受沉桩不到位影响很大	约400元/m <sup>2</sup>
方案三	水位变动区: 牺牲阳极的阴极保护法(35 a更换) + 重防护涂层(1100 $\mu\text{m}$ , 寿命10 a) + 桩内混凝土填芯 + 预留腐蚀量(腐蚀速度0.12 mm/a, 60 a需7.2 mm以上)。水中及泥土区: 牺牲阳极的阴极保护法(35 a更换) + 预留腐蚀量(腐蚀速度0.04 mm/a, 90 a需3.6 mm以上)。	有成熟施工经验; 阳极块寿命35 a, 100 a需二次; 更换阳极块; 工艺简单, 可操作性更强	约312元/m <sup>2</sup>

加保护范围, 且投资最大。方案一、三全部使用期采用了牺牲阳极的阴极保护, 该技术措施较可靠、成熟, 控制效果好, 使用年限长, 投资较低, 其中方案三可操作性更强, 经验较多。因此, 推荐采用方案三。

## 4 钻孔灌注桩防腐蚀

由于钻孔灌注桩的混凝土在水下靠自重压实, 因此其密实性难以与经过振捣密实的混凝土相比, 为增加钻孔灌注桩的防腐性能, 在适当增大钢筋保护层的厚度(至少为75 mm)的同时, 在灌注桩上部采用掺合料混凝土提高混凝土的密实度, 掺合料混凝土控制指标如表5。

表5 掺合料混凝土的控制指标

混凝土构件类型	混凝土强度等级	氯离子扩散系数 $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	电通量(C)
钻孔灌注桩	水下C30	3.0	$\leq 2000$

另外, 保留钻孔桩施工用钢护筒作为桩顶以下至泥下一定范围的一道防腐屏障。如钢护筒的壁厚按16 mm计, 则钢护筒在水位变动区至少可保护80 a左右, 加上钻孔灌注桩自身的耐久性, 钻孔灌注桩的使用寿命大于100 a。