海洋软土基础工程钢结构的腐蚀风险评价*

干伟忠[1]，王娟娣[2]，李跃明[1]

（1. 宁波工程学院 宁波 315016；2. 浙江大学宁波理工学院 宁波 315100）

摘　　要：海洋软土基础工程的腐蚀性检测指标和评价按照《公路工程地质勘察规范》或《岩土工程勘察规范》。然而，无论对于钢管桩，还是混凝土管桩接头，规范都没有考虑溶解氧、生物厌氧菌等腐蚀因素。为了提高海洋工程管桩基础的耐久性设计水平，文章针对典型的海洋软土土质特征，通过观察缺氧环境下钢材腐蚀电位变化规律，分析了海洋沉积淤泥质土中钢结构的腐蚀风险，提出了海洋环境下基础工程钢结构（钢管桩及混凝土管桩接头）微生物腐蚀和电化学腐蚀机理。文章认为硫酸盐还原菌腐蚀评价在三沙海洋工程建设的地质勘察中不可或缺，该检测项目应该列入国家标准。

关　键　词：海洋；软土；钢材；硫酸盐还原菌；腐蚀

1　引言

随着海洋经济建设上升为国家战略，支撑和配套的海岸工程（coastal engineering）和近海工程（offshore engineering）建设如火如荼。然而，我国沿海大陆架海相软弱土分布范围广泛，基本属于海洋相、潟湖相或溺谷相沉积，如东海海底表层大多为粉质黏土，其下为淤泥，下伏多为淤泥质粉质黏土，总厚度一般在 10～200 m 之间；而南海三沙海床更为复杂，不同海底地貌上沉积了厚度不一、类型不同的现代（Q4）海洋沉积物，这是一种具有固有特性而且对海洋工程建设和海洋开发有重要影响的一种软弱地基土。这类软土中超长的桩基础工程存在桩身施工、各向承载力、耐久性等科学和技术问题，其中涉及桩身及管桩接头耐久性的腐蚀问题目前尚缺乏系统的共识。

工程结构设计之前一般委托勘察单位对基础区域进行地质勘察，海水及海泥（海相软弱土）对基础工程的腐蚀性检测指标和评价则按照《公路工程地质勘察规范》（JTG C20－2011）、《岩土工程勘察规范》（GB 50021－2001/2009）、《港口岩土工程勘察规范》（JTS 133－1－2010）或《海上平台场址工程地质勘察规范》（GB/T 17503－2009）等。无论对于钢管桩，还是混凝土管桩接头，抑或是配筋的混凝土灌注桩，上述现行规范均不考虑溶解氧、电阻率、厌氧菌等腐蚀因素的评价，这显然是欠合理的。为了阐明这个问题，提高海洋管桩的耐久性设计水平，掌控工程的实际使用年限，针对海洋软土土质特征，揭示软土中钢材发生电化学腐蚀机理，分析形成海洋基础钢结构（钢管桩及混凝土管桩接头）腐蚀的必要和充分条件。

2　海洋工程地质特性

海洋浅层土质主要由全新世 Q_4^m 海相沉积淤泥及淤泥质土组成。从浅层软土的分布规律来看，杭州湾南岸表层覆盖有 6～8 m 厚的亚砂土层，其下为厚达 40 m 左右淤泥和淤泥质黏土，基本物理力学性质为含水率 ω 约 47%，重度 γ 约17 kN/m^3，孔隙比 e 约 1.33，液性指数 I_L 约 1.14，压缩系数 a 约 0.64 MPa^{-1}，压缩模量 E_S 约 4 MPa，内摩擦角 φ 约 3.9°，黏聚力 c 值约 27 kPa[3]。

而宁波象山港公路大桥施工区域的海底表层则以海洋相沉积的灰色、灰黄淤泥及淤泥质土

* 基金项目：国家自然科学基金项目（51078190）；浙江省自然科学基金资助项目（Y1100403）.

为主，压缩性高，强度低，地基承载力特征值 f_a 一般在 40～60 kPa，且灵敏度相当高，S_t 达 5～8，土层竖向渗透系数 k_v 相当小，总厚度为 30 m 左右(表 1)。

表 1　象山港海底土层物理力学性质参数

编号	土层名称	ω /%	Gs (—)	γ /(kN/m³)	e (—)	k_v /(×10⁻⁶cm/s)	Es /MPa	固快	
								φ/ °	c/ kPa
1	淤泥	61.9	2.76	16.30	1.76	0.168	1.65	8.8	12.0
2	淤泥质黏土	49.0	2.76	17.60	1.38	0.173	1.95	9.2	10.6
3	淤泥质粉质黏土	47.2	2.75	17.40	1.28	—	2.23	10.5	15.2

注：Gs—土粒的比重：土粒的质量与相同体积的 4℃时纯水的质量之比，无量纲．

舟山金塘渔港码头之围海工程，为淤泥质黏土。实测土样取样深度 8～10 m。pH 值、Cl^- 和 SO_4^{2-} 含量是根据《公路土工试验规程》(JTG E40－2007)测定，pH 值采用酸度计，Cl^- 和 SO_4^{2-} 分别采用硝酸银滴定法和质量法，增加的硫酸盐还原菌测试项目参照《工业循环冷却水中菌藻的测定方法》(GB/T 14643.5－2009)之 MPN 法。测试结果表明(表 2)，海相淤泥质黏土层除了盐碱成分较高外，还有值得充分重视的硫酸盐还原菌个数。因此氯盐、硫酸盐含量及厌氧的硫酸盐还原菌对地基基础的腐蚀性值得重视。不过，不同土样检测(试管阳性结果与 SRB 计数)显示，硫酸盐还原菌并非普遍存在(表 3)。

表 2　淤泥质黏土测试分析

土样名称	pH	SO_4^{2-}/%	Cl^-/%	硫酸盐还原菌/(个/g)
淤泥质黏土	8.3	0.058	0.60～0.65	1 700～3 000

表 3　硫酸盐还原菌试验结果

土样编号	稀释度和试管阳性情况						阳性组合指数	SRB 计数/(个/g)
	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	空白		个/g
1	++++	+++−	+−−−	+−−−	+−−−	−−−−	433	3000
2	−−−−	−−−−	−−−−	−−−−	−−−−		000	未检出
3	−−−−	−−−−	−−−−	−−−−	−−−−		000	未检出

3　海洋淤泥质土对结构钢材的腐蚀

海底沉积物腐蚀性评价指标[2]，一般认为主要有土体类别、视电阻率、pH 值、氧化还原电位 E_h、极化电流密度、质量损失、Fe^{3+}/Fe^{2+}、有机质等，而 Cl^- 和 SO_4^{2-} 含量以及厌氧的硫化物和硫酸盐还原菌指标则是影响钢材腐蚀主要因素。

3.1　腐蚀电池的作用过程

阳极金属 Me 被氧化腐蚀溶解，以阳离子形式迁移到溶液(电解液)中，同时把当量的电子留在金属上(式 1)；电子 e 通过金属本身从阳极迁移到阴极；溶液中的阳离子从阳极区迁移到阴极区，溶液中的阴离子从阴极区迁移到阳极区；从阳极迁移到阴极电子 e 被阴极去极化剂 D 吸收并发生还原反应(化学价降低)(式 2)。

$$[ne \cdot Me^{n+}](s) + H_2O(l) \rightarrow [Me^{n+}] \cdot H_2O(aq) + [ne](M) \quad (1)$$

$$D + [ne](M) \rightarrow [D \cdot ne] \quad (2)$$

显然，当阳极区的金属离子浓度过高积累，那么阳极电位将正移而产生活化极化，除此之外，产生阳极极化还可能是金属离子扩散不畅的浓差极化，以及钝化膜产生的电阻极化。类似

地，如果阴极区与电子结合的速度跟不上，可使阴极电位负移而产生阴极活化极化，同时阴极附近参与反应的物质或反应产物扩散缓慢，将产生阴极浓差极化。

对于海洋淤泥质土而言，钢结构腐蚀可能的阳极去极化反应是穿透力极强的 Cl^- 对钢铁钝化膜破坏的电阻去极化（式 3）；可能的阴极区极化反应氢离子和氧分子的阴极还原反应（式 4 和式 5）。

$$Fe^{3+}(s) + 3Cl^-(aq) \rightarrow FeCl_3(s) \quad (3)$$

$$2H^+(aq) + 2e(M) \rightarrow H_2(g) \quad (4)$$

$$O_2(g) + 2H_2O(l) + 4e(M) \rightarrow 4OH^-(aq) \quad (5)$$

因为氢电极的标准电极电位 $E_H = -0.414V$，发生析氢腐蚀的必要条件是该金属电极电位必须低于这个值，因此对于钢铁而言一般只在酸性介质中才发生析氢腐蚀，这在无工业污染的海洋淤泥质土中不可能。比较而言，在中性溶液中氧的还原电位为 $+0.805$ V，因此吸氧腐蚀应该是更为重要和具有可能性（式 5 至式 8）。

$$2Fe(s) + O_2(g) + H2O(l) = 2Fe(OH)_2(s) \quad (6)$$

$$4Fe(OH)_2(s) + O_2(g) + 2H_2O(l) = 4Fe(OH)_3(s) \quad (7)$$

$$2Fe(OH)_3(s) = Fe_2O_3 \cdot xH_2O + (3-x)H_2O(l) \quad (8)$$

虽然，海水中氧气溶解充分，特别是 20 m 深的范围内几乎含氧饱和，但海泥区是贫氧的，因此可以推断海洋淤泥质土中的钢结构的吸氧腐蚀会止于阴极极化作用，即使有继续也将是极其缓慢的。

3.2 淤泥质土中硫酸盐还原菌的腐蚀

文献显示[4]，钢结构在海底淤泥质土中遭受生物腐蚀，地下金属的损坏因生物腐蚀引起的约占 80%，其中最主要的是硫酸盐还原菌（Sulfate-Reducing Bacteria，SRB）引起的腐蚀。其腐蚀机理是：SRB 在生长和繁殖中，可将 SO_4^{2-} 还原成 H_2S（SRB 引起的阴极去极化），而 H_2S 具有强腐蚀性，它与 Fe 及 Fe^{2+} 生成 FeS。随着 SRB 数量增多，H_2S 含量上升，由 FeS 转化为 FeS1－x，既而又转化为 Fe1－xS。硫化物 Fe1－xS 结构疏松，容易脱落。所以 SRB 既有阴极去极化作用，又具有阳极去极化作用，加速了钢材的腐蚀。

$$4Fe + SO_4^{2-} + 4H_2O = FeS + 3Fe(OH)_2 + 2OH^- \quad (9)$$

微生物 SRB 对钢材腐蚀的电化学过程产生的影响，主要表现在以下几个方面：① 直接影响金属腐蚀的阳极和阴极反应；② 影响金属所处腐蚀环境的状况。代谢产生的无机酸、有机酸、硫化物等，增强了环境的腐蚀性，为金属表面氧浓差局部腐蚀电池等微观腐蚀电池的形成创造了条件；③ 影响金属表面的状况和性质。如产生沉淀物，破坏金属表面或金属表面保护性的覆盖层。

因此，至少在理论上可以认为，海底淤泥质土中 SRB 腐蚀评价是工程地质勘察中不可或缺的项目，不应该被忽略。为此，设计了下列试验，旨在探讨贫氧条件下，在可能 SRB 存在条件下的钢结构腐蚀风险。

4 试验与结果分析

4.1 原状软土中钢筋腐蚀电位试验与分析

选取 6 种象山港公路大桥海底不同深度软土土层作为实验对象（表 4，取样地点：SZK20－2）。试样高度为 30 cm，直径为 10 cm。选取直径为 10 mm 的 Q235（HPB235）光圆钢筋作为实验钢筋，选择高耐蚀性不锈钢作为参比电极。将实验钢筋与参比电极置于淤泥质土中（图 1 和图 2），为防止参比电极自身电位不同导致实验差异，将 6 组实验参比电极串联。两极电极进入土中后，将导线孔用环氧树脂密封。

表 4 某海底钻孔取土情况

土样编号	采样距离海底深度/m	土质状况
1	4.10～4.40	淤泥
2	10.60～10.90	淤泥质黏土
3	15.00～15.30	淤泥质黏土
4	20.40～20.70	淤泥质黏土
5	25.90～26.10	淤泥质黏土
6	30.20～30.50	淤泥质黏土

在埋置于淤泥质土中的钢筋与参比电极进行短接之前，因自身电化学性能不同会有各自的

腐蚀极化曲线，短接后通过高阻抗电位计，得到两者之间的宏电池腐蚀电位。试验结果显示(图3)，从上述曲线分析，腐蚀电位随土层深度不同变化较大。土样1～3相对阴极极化电位有极化特征，土样4～6无显著极化特征。

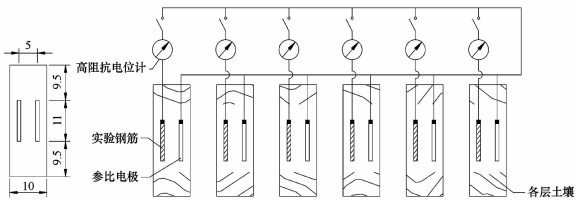

图1　实验原理及布置

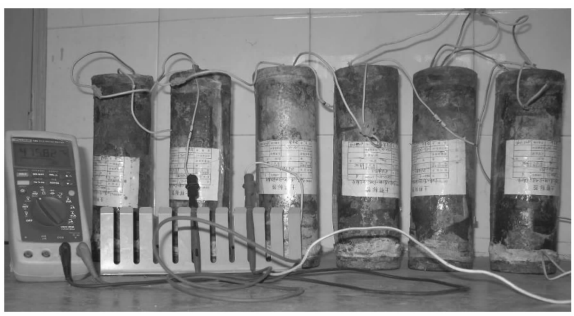

图2　实验装置

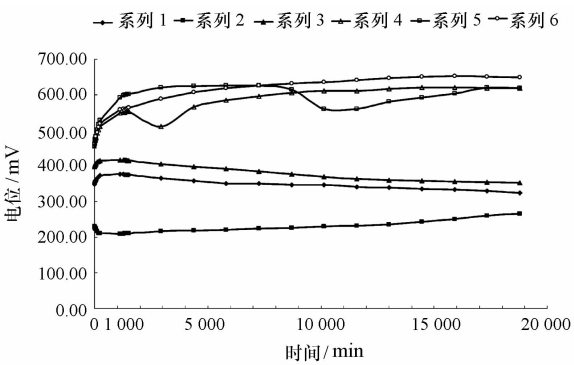

图3　相对阳极极化电位—时间关系

4.2　阳极极化试验与分析

阳极极化试验还是采用6种象山港公路大桥海底土样，具体同4.1所述，设计的实验装置及原理见图4和图5。试验结果显示(图6)，除了土样1和土样5，其他土样明显具有阳极极化特征。

土样氧化还原电位(soil redox potential)是指土样中的氧化态物质和还原态物质在氧化还原电极(本试验为硫酸铜电极)上达到平衡时的电极电位，是反映土样氧化还原状况的重要指标。

土样氧化还原电位的高低，取决于土样液中氧化态和还原态物质的相对浓度，氧化还原电位越高，氧化性越强，电位越低，氧化性越弱[5-6]。虽然腐蚀电位不能表征腐蚀速率，只有腐蚀电流密度才能评价材料的腐蚀速率，而且腐蚀电位与腐蚀速度没有必然的联系，不过腐蚀电位是个热力学参数，能够表征腐蚀趋势。综合上述两个试验，土样5的阴阳两极均无极化产生，具备了产生腐蚀的必要条件。

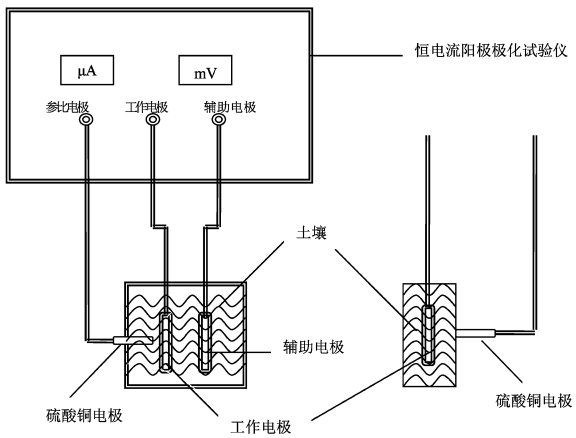

图4　实验装置原理

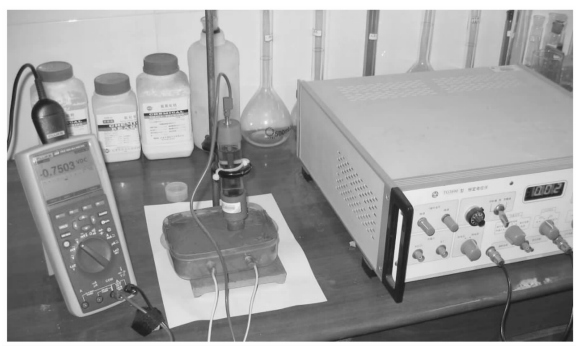

图5　试验装置

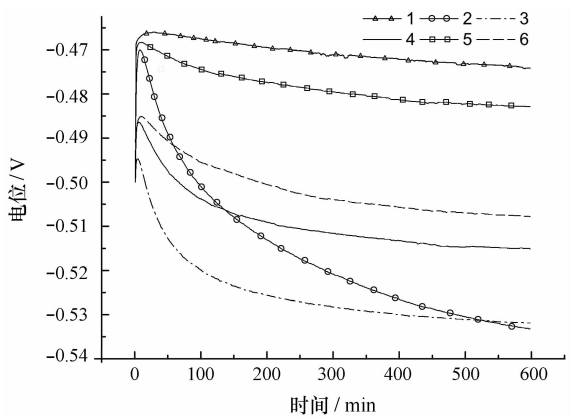

图6　电位—时间曲线

5 结论

(1)一般只在酸性介质中钢铁才发生析氢腐蚀，而无工业污染的南海三沙海洋淤泥质土中的钢结构不可能发生这种腐蚀。

(2)由于软土海泥区属于贫氧环境，因此海洋淤泥质土中的钢结构的吸氧腐蚀会止于阴极极化作用，即使有继续腐蚀，在工程级别上也是可以忽略的。

(3)海底软土淤泥质土中 SRB 对于贫氧环境中的钢结构(钢管桩、混凝土管装钢接头等)具有腐蚀风险，因此 SRB 腐蚀评价在三沙市海洋工程建设的地质勘察中是不可或缺的，该检测项目应该列入国家标准。

参考文献

[1] 熊厚金，林天健，李宁．岩土工程化学[M]．北京：科学出版社，2001.

[2] 吕小飞，杨义菊，陈小玲，等．杭州湾南部灰鳖洋海泥区腐蚀环境探讨[J]．海洋通报，2010，29(5)：504－508.

[3] 吕忠达．杭州湾跨海大桥关键技术研究与实践[M]．北京：人民交通出版社，2008.1.

[4] 朱绒霞，那静彦，郭生武，等．硫酸盐还原菌的腐蚀机理[J]．空军工程大学学报，2000，1(3)：10－12.

[5] 李祥云，陈虹勋，古森昌．南海珠江口东部海底沉积物腐蚀性研究[J]．热带海洋，1997，16(3)：90－98.

[6] Whonchee Leea，Zbigniew Lewandowskia，Sathoshi Okabea，et al. Corrosion of mild steel underneath aerobic biofilms containing sulfate-reducing bacteria part I：At low dissolved oxygen concentration，Biofouling：The Journal of Bioadhesion and Biofilm Research，1993，7(3)：197－216.