

钢板桩挡土结构加固方法研究

李格平¹ 郭 畅² 骆 城² 熊洪峰^{2,3}

(1. 天津港航工程有限公司, 天津 300457; 2. 交通部天津水运工程科学研究所 水工构造物检测、诊断与加固技术交通行业重点实验室, 天津 300456; 3. 哈尔滨工程大学 船舶工程学院, 哈尔滨 150001)

摘 要 基于天津港某码头钢板桩在恶劣海洋环境下出现的严重锈蚀破损现象, 采用 ANSYS 有限元建立了钢板桩结构与土相互作用的数值计算模型, 分析了钢板桩在锈蚀及局部破损状况下的结构安全性。通过对帽板加固法、局部外包法的有限元计算分析, 得到了以上 2 种加固方案下的土体变位和钢板桩受力情况, 并结合经济性和施工可行性等指标推荐局部外包法为最优加固方案。

关键词 钢板桩; ANSYS; 帽板加固法; 局部外包法

中图分类号: U 656.1*13

文献标识码: A

文章编号: 1005-8443(2010)03-0215-05

斜顶桩钢板桩挡土结构是依靠斜顶桩提供水平抵抗力, 帽梁连接斜顶桩与钢板桩, 钢板桩将上部水平力传至土层深处进而减小岸坡变形的结构型式。根据《天津港码头设施 2008 年秋季调查报告》^[1]可知, 天津港某码头钢板桩挡土结构在恶劣的海洋环境中因锈蚀、电化学腐蚀、海浪冲刷等作用, 出现了严重的锈蚀破损现象^[2]。为了保障码头的安全使用, 亟需对钢板桩挡土结构进行加固。

钢板桩挡土结构加固方法的研究还处于理论阶段, 在经济性和施工难易度 2 个指标的制约下, 能用于工程实际的加固方法现在还不多见, 本文运用 ANSYS 有限元模型对工程实例进行数值分析, 对钢板桩挡土结构加固方案进行比选, 寻求能够运用于工程实际的最优加固方案。

1 工程概况

码头的钢板桩挡土结构为钢板桩+斜顶桩+帽梁型式。挡土结构是由厚 45 cm 的预应力板桩墙、55 cm×55 cm 的预应力空心斜顶桩和帽梁构成的挡土墙, 板桩墙和斜顶桩的连接型式为固接。板桩桩尖打至-17.5 m, 斜顶桩桩尖打至-22.0 m, 相邻斜顶桩间距为 3.5 m。其码头局部断面见图 1。

根据现场测试可知, 该钢板桩挡土结构的大多数钢板桩只剩下 80% 的残余厚度(钢板桩原厚度为 15 mm, 80% 的残余厚度为 12 mm), 部分破损严重区域的钢板桩已出现了 300 mm×500 mm 的锈洞(图 2)。

2 ANSYS 有限元计算模型的建立

为了准确模拟桩土之间的摩擦力, 考虑各构件之间力传递的复杂性, 本文采用实体单元 solid45。各构件之间的连接形式均为固接。为减小建模的难度并能划分出计算相对精确的规则网格, 采用式(1)、式(2)对 U 形钢板桩进行一定的简化。根据码头结构段的对称性, 沿码头岸线方向取 3.5 m 范围, 岸-海方向取 83 m 范围(码头前沿外-13 m, 码头前沿往后取-70 m)。模型示意图见图 3, 有限元模型网格见图 4。模型的底面设为全约束, 由于模型在岸-海方向选取了足够的长度, 故不考虑 X 方向的位移, 模型前后两侧仅设置 X 方向的

收稿日期: 2010-01-08; 修回日期: 2010-03-09

作者简介: 李格平(1969-), 女, 陕西省西安市人, 高级工程师, 主要从事港口基本建设工作。

Biography LI Ge-ping(1969-) female, senior engineer.

约束,模型的左右两侧设为对称约束^[3]。

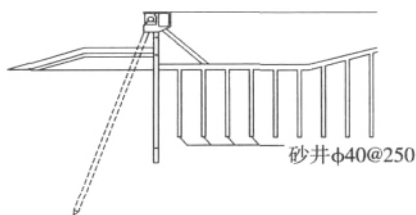


图1 码头局部断面图

Fig.1 Local section view of the pier

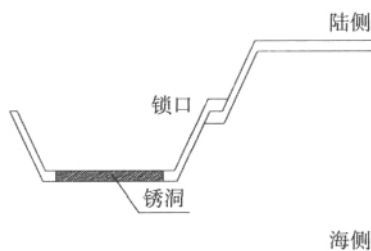


图2 钢板桩锈洞位置

Fig.2 Position of corrosion on steel sheet pile

$$E_c I_c = E_s I_s \quad (1)$$

$$E_c A_c = E_s A_s \quad (2)$$

式中 E_c 、 E_s 分别为计算弹性模量和钢的弹性模量; I_s 、 A_s 分别为 U 形钢板桩的惯性矩和截面面积, 钢板桩的截面面积和惯性矩参照《港口工程钢结构设计规范》^[4](JTJ283-99); I_c 、 A_c 分别为计算模型中连续墙的惯性矩和截面面积。

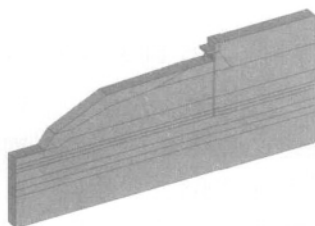


图3 模型示意图

Fig.3 Sketch of model

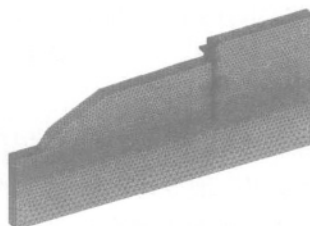


图4 有限元模型网格

Fig.4 Finite element meshing

3 钢板桩锈蚀及破损情况的有限元分析

本文采用 ANSYS 有限元分别计算了钢板桩在完好状态下、锈蚀情况下(还有 80% 的残余厚度)、局部破损(300 mm×500 mm 的锈洞)情况下,在后方堆场设计荷载为 5 T/m² 的竖向荷载下,土体的最大水平位移和钢板桩的最大压应力,计算结果见表 1。

由表 1 可以看出:(1) 钢板桩在完好状态下,土体的最大水平位移要比锈蚀或者破损状态的最大水平位移小得多。这是由于钢板桩在受到后方土体压力作用时,形成了一种超静定梁的结构(上面固接在斜顶桩,下面沿 X 方向支撑在土上)。钢板桩在完好状态时其刚度较大,在同样的主动土压力作用时,其变形较小,从上支座到下支座间的板桩引起的板桩另一侧的被动土压力较小,而使大多数的主动土压力在板桩的作用下传递到了土体的深处,土体的最大水平位移较小,钢板桩锈蚀或者破损后其抗弯刚度下降,在土体上部对钢板桩的另一侧产生了较大的被动土压力,主动土压力就不能很好地传递到土体深处。故使土体的最大水平位移有所增加。(2) 在完好状态下,钢板桩的最大压应力也比锈蚀或者破损情况下板桩的压应力要小的多,并且根据《港口工程钢结构设计规范》Q235 钢材的抗弯强度设计值为 $f=215 \text{ N/mm}^2$,钢板桩在锈蚀区域板桩的应力和破损情况下锈洞附近完好板桩的应力均超过了 215 N/mm^2 ,板桩处于不安全状态。

表 1 钢板桩在锈蚀及破损情况下的土体最大水平位移和板桩最大压应力

Tab.1 Soil maximum horizontal displacement and sheet pile maximum compression stress under conditions of corrosion and localized damage

状态	土体最大水平位移(mm)	板桩的最大压应力(N/mm ²)
完好	14.9	194
锈蚀	17.7	367
破损	20.6	233

4 钢板桩修复加固方案

修复加固方法大致可以分为局部维修加固法和设置替代挡土结构法 2 大类。局部维修加固法包括补焊钢板法、局部外包加固法、降低帽梁覆盖高程法、改善墙后土体性能法等,设置替代挡土结构法包括增设地下连续墙法、增设替代钢板桩法等^[5]。

钢板桩出现锈洞破损,最直接的方法就是焊接钢板修复,再作涂料防锈处理,但是补焊的钢板同钢板桩形成电偶,补焊的钢板作为阳极很快被消耗,这就导致二次锈蚀问题^[6]。改善墙后土体法虽然工程造价低,但加固效果较差,主要用于新建码头,不适用于本工程。地下连续墙法、增设替代钢板桩法不仅会影响码头的正常作业,而且工程量巨大,工程造价高。

根据工程特点、预期加固效果等因素,提出帽板加固法和局部外包法 2 种加固方案。通过建立 2 种方法的 ANSYS 有限元模型进行数值计算,并结合施工可行性和经济性推荐最优方案。

4.1 帽板加固法

4.1.1 帽板加固介绍

帽板加固法的优点是施工作业面不涉及码头面以上,无需开挖码头挡土墙后方土体,施工简便,不影响生产,缺点是会给斜顶桩增加一定的弯矩。帽板加固法具体内容和要点如下。

(1) 帽板式钢筋混凝土加固体分为加固板和斜顶桩外包体 2 部分,有关尺寸可在下列数据基础上进行调整:加固板长 $L=3\ 500\text{ mm}+550\text{ mm}+300\text{ mm}=4\ 350\text{ mm}$,根据斜顶桩间距调整,加固板厚 $A=300\text{ mm}$,设置净保护层 50 mm ,双侧双向配筋,加固板高 $H=1\ 500\text{ mm}$,根据钢板桩顶部锈蚀破损情况,从泥面向下开挖至钢板桩剩余厚度满足要求处,加固板高度据此调整。斜顶桩外包混凝土尺寸为沿桩周外扩 150 mm ,其高度与加固板同高,施工有困难时也可以略小于加固板高度。对于已经铰接外包的斜顶桩可以利用原外包体形成对加固板的支撑。

(2) 为加强整体性,应在帽梁底部栽锚筋,加固板底部附近的钢板桩上焊拉筋,其他高度焊抗剪器。所以焊接金属均应处于加固混凝土保护内。

4.1.2 帽板加固法的有限元分析

考虑到泥面以下的钢板桩尚可发挥剩余作用,直接在钢板桩锈洞位置采用帽板式钢筋混凝土加固,将尚能工作的钢板桩通过加固体与斜顶桩连接起来,帽板加固法方案见图 5。

计算得到帽梁加固法下土体的最大侧向位移为 14.7 mm ,说明采用帽板加固法能够将锈洞以下的钢板桩与帽梁的共同作用重新建立关系。土体的侧向位移见图 6。通过计算得到钢板桩的最大压应力为 195 N/mm^2 ,小于 Q235 钢材的抗弯强度设计值为 $f=215\text{ N/mm}^2$,板桩处于安全状态。但是钢板桩在土体竖向摩擦力的作用下下沉,会使斜顶桩受到很大的弯矩,帽板加固法使原本斜顶桩产生的抵抗主动土压力的水平力作用点向下移,进一步增大了斜顶桩受到的弯矩,虽然帽板加固法对斜顶桩上部进行了外包加固,但是结合第一主应力和第三主应力,斜顶桩加固桩帽的底部受力相对集中,第一主应力和第三主应力的最大值均出现在这个位置,其中第一主应力最大值为 34 MPa ,第三主应力最大值为 37.6 MPa 。这是斜顶桩在上述弯矩作用下的结果,虽然斜顶桩受到的水平力会产生一定的反弯矩,斜顶桩受到的弯矩会沿帽梁底部向下有一定的降低,但是在斜顶桩加固桩帽底部的弯矩还未减小到安全弯矩,故还应对斜顶桩进行一定的加固,即通过计算在帽板加固法加固桩帽的底部一定长度内再进行外包加固。外包桩帽、浇筑帽板以及结构的不规则性使钢筋配置和尺寸确定比较繁琐。

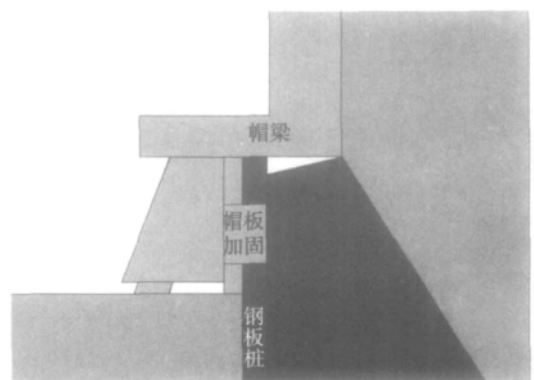


图 5 帽板加固法模型断面图

Fig.5 Section view of cap reinforcement

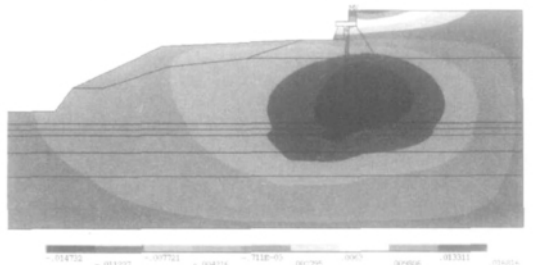


图 6 土体侧向位移

Fig.6 Transverse displacement of soil

4.2 局部外包法

4.2.1 局部外包法介绍

考虑到帽板加固法中斜顶桩的受弯特性和现场施工难度,提出了对破损钢板桩采用钢筋混凝土局部外包法。该方法优点是施工可操作性强,不会影响斜顶桩的受力性能,缺点是利用了原部分锈损的钢板桩。

局部外包法方案要点如下:(1)用钢筋混凝土板加固钢板桩锈蚀破损部分(类似“夹板法”接骨处理);(2)在钢板桩破损上下焊接锚筋生根,使其与外包体形成整体作用,共同受力;(3)在钢板桩原排水孔位置,依然预留排水孔;(4)加固体底部可按极端低水位-1.29 m设计;(5)如采用干法施工,需局部掀开码头后承台一跨面板,进行深层支护施工,清泥形成施工作业面,然后浇筑钢筋混凝土加固体。

4.2.2 局部外包法的有限元分析

钢板桩局部外包方案是在钢板桩产生锈洞的位置,对钢板桩进行局部加固,使钢板桩恢复到需要的强度和状态。局部外包法方案见图7。

计算得到帽梁加固方法下土体的最大侧向位移为14.68 mm,说明采用局部法能够将锈洞上下的钢板桩连接起来,使钢板桩接岸结构体系的共同作用得到恢复。土体的侧向位移见图8。通过有限元得到局部外包法下的钢板桩弯矩图(图9)和轴力图(图10),然后根据式(3)^[7]得到钢板桩的最大压应力为93 N/mm²(高程-2 m处),处于安全状态。

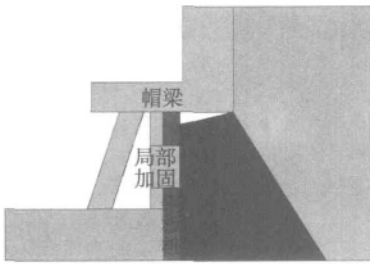


图7 局部外包法模型断面图

Fig.7 Section view of local reinforcement

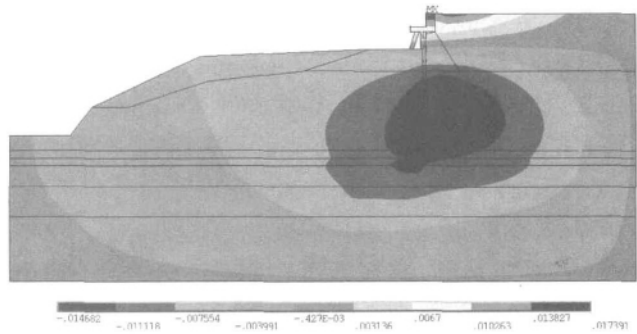


图8 土体侧向位移

Fig.8 Transverse displacement of soil

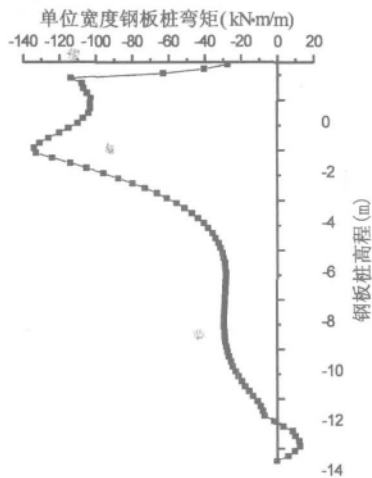


图9 钢板桩弯矩图

Fig.9 Moment values of steel sheet pile

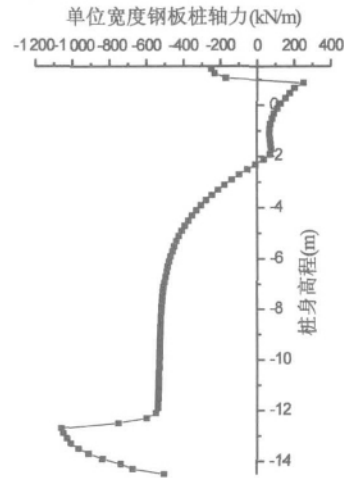


图10 钢板桩轴力图

Fig.10 Axial force of steel sheet pile

$$\frac{\gamma_{GQ}}{1000} \left(\frac{N_k}{A} + \frac{M_{\max}}{W_z} \right) \leq f \quad (3)$$

对局部外包法加固后的混凝土构件(帽梁结构和加固体)进行应力分析,通过分析第一主应力图可知,加固混凝土体的海侧方向是受拉的主要区域,最大第一主应力出现在加固体顶端,最大值为2.37 MPa,超过了抗拉强度1.78 MPa,但范围较小,但是加固体在向海侧配有钢筋,只要适当增加配筋率便能满足抗拉条

件。由第三主应力分析可知,主要受压区域为斜顶桩与帽梁连接处和加固体的岸侧,但是应力值都相对较小,对结构没有影响。

5 结论

本文针对天津港某码头钢板桩锈蚀破损特征并考虑加固的经济性、施工可行性等因素,提出了2种加固比选方案:帽板加固法和局部外包法。综合有限元计算分析结果,帽板加固法可以将泥面以下的钢板桩与斜顶桩和帽梁连接起来,重新实现了接岸结构的功能,但是斜顶桩桩帽位置加固体的受力较大。局部外包法是在钢板桩产生锈洞的位置采用钢筋混凝土外包,计算接岸结构变形特征分析结果表明,其加固效果也可基本达到钢板桩完好情况的水平,钢板桩及结构的受力也能满足要求。

综合以上加固方案的特点及数值分析结果,推荐在钢板桩产生锈洞位置采用局部外包法对钢板桩进行加固,该方案施工难度相对较低、可操作性较强、工程量小、不影响码头的正常作业,且加固后接岸结构的变形和受力也能满足使用要求。

参考文献:

- [1] 刘现鹏,张强.天津港码头设施2008年秋季调查报告[R].天津:交通部天津水运工程科学研究所,2008.
- [2] 朱锡昶,李岩,葛燕,等.使用20年岸壁式钢板桩码头的腐蚀与破坏[J].港工技术,2008(4):31-34.
ZHU X C, LI Y, GE Y, et al. Corrosion and Failure of Steel Plate Piles of Quay Pier after Using Twenty Years[J]. Port Engineering Technology, 2008(4): 31-34.
- [3] 廖雄华,张克绪.天津港高桩码头桩基—岸坡土体相互作用的数值分析[J].水利学报,2002(4):81-87.
LIAO X H, ZHANG K X. Numerical analysis of pile-soil interaction in long-piled wharf of Tianjin Port[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002(4): 81-87.
- [4] JTJ 283-99.港口工程钢结构设计规范[S].
- [5] 沈运峰,凌炯浩,郭启泉,等.某钢板桩码头的大修技术[J].水运工程,1991(6):13-17.
SHEN Y F, LING J H, GUO Q Q, et al. Overhaul Technique for a Sheet-pile Wharf[J]. Port & Waterway Engineering, 1991(6): 13-17.
- [6] 朱锡昶,葛燕,朱雅仙,等.海水中近60年钢板桩的腐蚀状况[J].海洋工程,2003(5):87-91.
ZHU X C, GE Y, ZHU Y X, et al. Corrosion status of steel plate piles exposed to seawater for sixty years[J]. The Ocean Engineering, 2003(5): 87-91.
- [7] 苏翼林,赵志刚,王燕群,等.材料力学[M].天津:天津大学出版社,2001.

Research on reinforcement method of steel sheet pile retaining structure

LI Ge-ping¹, GUO Chang², LUO Cheng², XIONG Hong-feng^{2,3}

(1. Tianjin Port & Channel Engineering Co. LTD, Tianjin 300457, China; 2. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Key Laboratory of Harbor & Marine Structure Safety, Ministry of Communications, Tianjin 300456, China; 3. College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract Based on the problem of serious corrosion for steel sheet pile in Tianjin Port under severe ocean conditions, a numerical computational model concerning the interaction between the steel sheet pile and the soil was established using the ANSYS software. Then structure safety of the steel sheet pile under conditions of corrosion and localized damage was analyzed. Besides, the soil movement and the force distribution were gained through FEM computational analysis of cap reinforcement and local reinforcement. Finally the local reinforcement is proved to be optimal by combining the feasibility and economy performance.

Key words steel sheet pile; ANSYS; cap reinforcement; local reinforcement