深水基础钢板桩围堰最小入土深度分析

张 骏

(上海铁路局建设管理处,上海 200071)

摘要:以沪杭高铁横潦泾特大桥河道中央主墩深水基础钢板桩围堰为例,分别采用空间有限元法、平面有限元法和等值梁法,计算钢板桩的最小入土深度。计算结果表明:等值梁法可用于桥梁深水基础钢板桩围堰的最小入土深度计算,且计算结果偏于安全;空间有限元法、平面有限元法和等值梁法所计算的钢板桩最小入土深度依次增大,但变化幅度不大;采用等值梁法计算钢板桩最小入土深度时,对于封底混凝土以下的多层土,可以采取等效土层的方法计算作用在钢板桩上的主动和被动土压力,从而简化土压力的计算。

关键词: 深水基础; 钢板桩围堰; 最小入土深度; 有限元法; 等值梁法

中图分类号: U445.556 文献标识码: A 文章编号: 2095-0373(2013) 03-0037-06

0 引言

钢板桩围堰具有强度高、结合紧密、防漏水性好以及施工简便、速度快、造价低等特点,在深水基础承 台施工中得到了广泛的应用。目前,深水基础钢板桩围堰设计过程中,钢板桩的最小入土深度通常采用 简化的计算方法^[1-5],其计算结果是否合理,有必要开展进一步的深入研究。结合沪杭高铁跨横潦泾河连 续梁特大桥深水基础钢板桩围堰施工实例,分别采用空间有限元法、平面有限元法和等值梁法,对钢板桩 的最小入土深度进行了系统分析和对比研究,研究成果可为今后钢板桩围堰设计提供可靠依据。

1 沪杭高铁横潦泾特大桥深水基础钢板桩围堰设计概况

1.1 工程概况

沪杭高铁横潦泾特大桥位于上海市松江区, 桥梁全长15.3 km 在黄浦江上游的横潦泾河处采 用一联四跨连续梁方式跨越(图1),跨径布置为 75+135+135+75 m,以62°斜交角度跨越横潦泾 河。桥梁主墩编号为119[#]~123[#],其中,121[#]墩为 水中墩,位于河道中央,将原河道分成上行、下行



两航道。其基础为 16 根直径 2.0 m 的钻孔桩 桩长 121.5 m; 承台为埋入式 ,底标高 – 15.254 m ,平面尺 寸 19.75 m × 19.75 m 厚度 4.5 m; 承台上设墩座 ,平面尺寸 14.0 m × 14.0 m 厚度 2.5 m 桥墩为 7 m 直 径圆形墩 墩高 21.5 m ,顶设预应力墩帽。

1.2 地质条件

本工程位于冲积湖平原区,上部为第四系全新统黏性土及粉土、粉砂层,厚 20~50 m,其下为上更新统黏性土及粉细砂层;桥位内的褶曲、断裂等构造均隐伏于深厚层第四系地层以下的基岩内,对工程无重大影响,无不良地质作用。121[#]墩位处河床实测标高-11.4~-11.8 m。

1.3 钢板桩围堰设计方案

钢板桩围堰为方形,平面尺寸24.0m×24.0m,设计桩长29m,围堰顶标高为+3.5m,围堰底标高为

收稿日期: 2013 - 01 - 14 作者简介: 张骏 男 1973 年出生 高级工程师 -25.5 m 討底混凝土厚 2.2 m ,入土深度 14.1 m ,设 5 道内支撑 加图 2 所示^[6]。钢板桩采用日本产 SK-SP-SX27 型即拉森 \I型高强度钢板桩 材质 SY295 ,单根宽度 60 cm。内支撑圈梁采用 H588 及 H800 型钢 梁 斜撑采用 Φ800 × 12 mm、Φ630 × 10 mm 钢管。



图 2 钢板桩围堰结构图(单位:mm)

2 钢板桩最小入土深度的计算方法

首先,分别采用钢板桩围堰空间有限元模型、平面有限元模型或等值梁法,确定钢板桩围堰桩体反弯 点的位置; 然后,计算得到桩体反弯点截面的剪力 Q; 再通过建立反弯点至桩底的钢板桩有限元模型,计算 钢板桩在剪力 Q 和土压力共同作用下的弯矩零点,从而得到封底混凝土底面至弯矩零点的距离 t_0 ; 最后, 按 $t = Kt_0$ 计算桩体的入土深度,其中 K 为经验系数,一般取 1.1 ~ 1.2。

横潦泾特大桥采用水中自下而上下放内支撑,派潜水员水下将钢板桩与圈梁间抄垫紧,然后抽水至 封底混凝土的施工方案。根据钢板桩围堰的主要施工步骤,围堰内抽干水时的工况为最不利工况。以此 工况作为计算依据,水压力作用考虑静水压力单独作用以及静水压力和流水压力共同作用两种荷载情 况。

根据上海海洋地质勘察公司提供的 121[#]墩工程勘察报告,各土层物理力学参数如表1所示。计算采用的水位标高为+1.5m,河床面标高为-11.4m,承台顶标高为-10.754m,承台底标高为-15.254m, 封底混凝土底面标高为-17.454m。围堰顶标高为+3.5m,五道内支撑从上到下的标高分别为+2.0m、-1.0m、-3.9m、-6.7m和-9.4m。钢板桩截面几何参数为:钢板桩有效宽度 600mm、有效高度 210mm、腹板厚 18mm,单根钢板桩截面面积 135.3 cm²、理论质量 106 kg/m、惯性矩 8 630 cm⁴、截面模量 539 cm³,每延米钢板桩截面面积 225.5 cm²、理论质量 177 kg/m²、惯性矩 56 700 cm⁴、截面模量 2 700 cm³。

土层名称	土层顶标高/m	土层底标高/m	容重/(kN・m ⁻³)	内摩擦角/(°)	粘聚力/kPa
细砂	-6.5	- 12.1	19.2	26.5	0
淤泥质粘土	-12.1	- 16.3	18.0	19.5	12
灰色粘土	- 16.3	-20.4	17.6	15.5	17
粉质粘土	-20.4	-23.7	19.7	20.5	43
粉砂	-23.7	-28.9	19.1	32.5	6

表1 桩周土层物理力学参数

3 钢板桩最小入土深度的计算结果

3.1 空间有限元法

钢板桩、内支撑、圈梁均采用梁单元模拟,封底混凝土采用 板单元(板厚2.2m)模拟,建立钢板桩围堰结构空间有限元计 算模型,如图3所示。该模型共有3322个节点2940个单元, 其中,梁单元2796个 板单元144个。相邻钢板桩、钢板桩与圈 梁、钢板桩与封底混凝土以及圈梁与内支撑之间均假定为铰接。

封底混凝土底面土对其约束作用采用只受压的面弹性支承 模拟,其面弹性支撑刚度为: $k_z = m \times h = 8\ 000 \times [-11.4 - (-17.454)] = 48\ 432\ kN/m/m²$.钢板桩底部假定为固定铰约束。

钢板桩围堰在河床面至封底混凝土间的围堰外侧土对钢板 桩的约束作用采用单向土弹簧模拟(即只能受压不能受拉的非 线性弹簧),封底混凝土至桩底间的钢板桩两侧土体对钢板桩的



图 3 钢板桩围堰空间有限元计算模型

约束作用采用双向弹簧模拟 弹簧的水平刚度 $k = b \times C_z \times L$ 其中 b 为板桩的计算宽度 $C_z = m \times h$ 为地 基的水平抗力系数 m 为地基的比例系数 h 为土层深度; L 为土弹簧所模拟的桩周土的厚度。

3.1.1 静水压力作用下的钢板桩最小入土深度

图 4 和图 5 分别表示采用钢板桩围堰空间有限元模型计算出现最大应力的钢板桩弯矩和剪力分布 (标高为 – 20.8 m ~ – 17.2 m 区段)。从图 4 可看出,该板桩反弯点位置标高为 – 19.0 m,距封底混凝土 底面 1.546 m;由图 5 可知,反弯点截面的剪力 Q = 159.6 kN。

截取反弯点至桩底段建立板桩有限元模型(参见图 6),计算板桩在剪力 Q 及土压力共同作用下的弯 矩(参见图 7)。从图 7 可看出,弯矩零点的标高为 – 23.756 m,由此可求得封底混凝土底面至弯矩零点的 距离 $t_0 = -17.454 - (-23.756) = 6.302$ m,桩底至封底混凝土底面的最小距离 $t = (1.1 \sim 1.2) t_0 =$ 6.932 ~ 7.562 m,则钢板桩的最小入土深度(桩底至河床面的最小距离,下同)为 $t + 6.054 = 12.986 \sim 13.$ 616 m。

3.1.2 静水压力和流水压力共同作用下的钢板桩最小入土深度

计算结果表明,钢板桩围堰空间有限元模型计算得出的钢板桩反弯点位置标高为 – 19.2 m,距封底 混凝土底面 1.746 m,反弯点处的剪力 Q = 191.8 kN。

截取反弯点至桩底段建立钢板桩有限元模型,计算板桩在剪力 Q 及土压力共同作用下的弯矩。计算 得出弯矩零点的标高为 – 23.934 m,由此可求得封底混凝土底面至弯矩零点的距离 $t_0 = -17.454 - (-23.934) = 6.48 m 桩底至封底混凝土底面的最小距离 <math>t = (1.1 \sim 1.2) t_0 = 7.128 \sim 7.776 m$ 则钢板桩的 最小入土深度为 $t + 6.054 = 13.182 \sim 13.830$ m。

3.2 平面有限元法

选取单根板桩 采用梁单元 建立如图 8 所示的钢板桩围堰平面有限元计算模型。

3.2.1 静水压力作用下的钢板桩最小入土深度

计算结果表明,采用钢板桩围堰平面有限元模型计算得出的钢板桩反弯点位置标高为 – 19.18 m,距 封底混凝土底面 1.726 m,反弯点处的剪力 Q = 241.6 kN。

截取反弯点至桩底段建立板桩有限元模型,计算板桩在剪力Q及土压力共同作用下的弯矩。计算得 到弯矩零点的标高为 – 23.962 m,由此可求得封底混凝土底面至弯矩零点的距离 $t_0 = -17.454 - (-23.962) = 6.508 m 桩底至封底混凝土底面的最小距离<math>t = (1.1 \sim 1.2)t_0 = 7.159 \sim 7.810 m$ 则钢板桩的最小入土深度为 $t + 6.054 = 13.213 \sim 13.864 m$ 。

3.2.2 静水压力和流水压力共同作用下的钢板桩最小入土深度

计算结果表明,采用钢板桩围堰平面有限元模型计算得出的钢板桩反弯点位置标高为 – 19.28 m,距 封底混凝土底面 1.826 m,反弯点处的剪力 Q = 262.1 kN。

截取反弯点至桩底段建立钢板桩有限元模型,计算板桩在剪力Q及土压力共同作用下的弯矩。计算 得到弯矩零点的标高为 – 24.12 m,由此可求得封底混凝土底面至弯矩零点的距离 t_0 = – 17.454 – (–



图7 反弯点至桩底段板桩弯矩分布(单位:kN・m) 图8 钢板桩围堰平面有限元计算模型 24.12) = 6.666 m 桩底至封底混凝土底面的最小距离 t = (1.1 ~ 1.2) t₀ = 7.333 ~ 7.999 m 则钢板桩的 最小入土深度为 t + 6.054 = 13.387 ~ 14.053 m。

3.3 等值梁法

3.3.1 静水压力作用下的钢板桩最小入土深度

作用在钢板桩围堰外侧和内侧的主动和被动土压力采用朗肯土压力理论,分别采用两种计算方法: 一种为分层法;另一种为封底混凝土以下采取等效土层的方法。

3.3.1.1 分层法计算主、被动土压力

分别计算钢板桩围堰外侧自河床面至桩底土的主动土压力和钢板桩围堰内侧封底混凝土顶面至钢

板桩底面土的被动土压力 封底混凝土底面处的超载为 q_0 $r = \gamma h = 57.2 \text{ kN/m}^2$ 。取单根钢板桩计算宽度 (0.6 m) 围堰外侧主动土压力分别为: 第一层土, E_{a1} = 22.57 kN; 第二层土, E_{a2} = 219.618 kN; 第三层 土 , E_{a3} = 370.69 kN; 第四层土 , E_{a4} = 298.376 kN。围堰内侧被动土压力为: 第一层土 , E_{p1} = 417.7 kN; 第二层土 , $E_{p2} = 1.036.66$ kN; 由于 $E_{a1} + E_{a2} + E_{a3} = 612.878$ kN > E_{p1} ,而 $E_{a1} + E_{a2} + E_{a3} + E_{a4} = 911.254$ $kN < E_{n1} + E_{n2} = 1$ 454.36 kN。因此净土压力为零的点应在河床面以下第4 层的粉质粘土层内 假设该点 位于粉质粘土层顶面以下 x,该点的主动土压力为: $P_a = (q_0 + \gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2 + \gamma_3 h_3 + \gamma_4 x) K_a$ – $2c \sqrt{K_a} + \gamma_w (h_1 + h_2 + h_3 + x) = (126.516 + 14.656x) kN/m^2$; 被动土压力为: $P_p = (q_0 + \gamma_3 h_3 + x)$ 14. 656x) 0. 6x = (75. 91x + 4. 396 8x²) kN, E_{y2} = 0. 5(453. 41 + 453. 5 + 42. 5x) 0. 6x = (272. 1x + 12.75 x^2) kN 。由净土压力为零可得到: $E_{a1} + E_{a2} + E_{a3} + E_{a4} = 612.878 + 75.91x + 4.3968x^2 = E_{p1} + 612.878 + 75.91x + 75.91x$ E_{p2} = 417.7 + 272.1x + 12.75x²。求解方程可得: x = 0.96 m。即反弯点的位置位于粉质粘土层顶部以下 0.96 m 此处标高为-21.360 m。

采用 midas 软件建立桩顶至反弯点的钢板桩模型,计算得到反弯点截面处的剪力为Q = 204.4 kN。 截取反弯点至桩底段建立板桩有限元模型,计算得到钢板桩在剪力 ()及土压力共同作用下的弯矩零点的 标高为 - 24.141 m ,由此可求得封底混凝土底面至弯矩零点的距离 t₀ = -17.454 - (-24.141) = 6.687 m 桩底至封底混凝土底面的最小距离 $t = (1.1 \sim 1.2) t_0 = 7.356 \sim 8.024$ m 则钢板桩的最小入土深度 为 $t + 6.054 = 13.410 \sim 14.078$ m。

3.3.1.2 封底混凝土以下采取等效土层计算主、被动土压力

对封底混凝土以下部分土层参数加权平均处理得到等效土层参数为:等效土层顶标高 - 17.454 m、 底标高 - 28.9 m ,重度 18.9 kN/m³ 粘聚力 19.5 kPa、内摩擦角 24.7°, 注动土压力系数 0.41、被动土压力 系数2.43。

同理计算得到反弯点位于封底混凝土底面以下 3.55 m(标高为 - 21.004 m)。

采用 midas 软件建立桩顶至反弯点的钢板桩模型,计算得到反弯点截面处的剪力为 231.9 kN。截取 反弯点至桩底段建立钢板桩有限元模型,计算钢板桩在剪力0及土压力共同作用下的弯矩零点的标高为 -24.064 m 由此可求得封底混凝土底面至弯矩零点的距离 $t_0 = -17.454 - (-24.064) = 6.61$ m , 桩底 至封底混凝土底面的最小距离 $t = (1.1 \sim 1.2) t_0 = 7.271 \sim 7.932$ m 则钢板桩的最小入土深度为 t + 1.26. 054 = 13. 325 ~ 13. 986 m.

采用两种土压力计算方法得到的钢板桩围堰在静水压力作用下最小入土深度如下:分层法为 13.410~14.078 m; 等效土层法为 13.325~13.986 m。

可看出 采用等效土层法计算封底混凝土以下土层对钢板桩的土压力所得到的钢板桩最小入土深度 略小于采用分层法所求得的计算值,两者相差0.7%。因此,采用等值梁法计算钢板桩最小入土深度时, 对于封底混凝土以下的多层土,可以采取等效土层的方法计算其作用于钢板桩的主、被动土压力,从而简 化土压力的计算。

3.3.2 静水压力和流水压力共同作用下的钢板桩最小入土深度

采用 midas 软件建立桩顶至反弯点的钢板桩模型,计算得到反弯点截面处的剪力为 Q = 242.6 kN。 截取反弯点至桩底段建立钢板桩有限元模型,计算得到钢板桩在剪力Q及土压力共同作用下的弯矩零点 的标高为 - 24.231 m,由此可求得封底混凝土底面至弯矩零点的距离 t₀ = -17.454 - (-24.231) = 6.777 m 桩底至封底混凝土底面的最小距离 t = (1.1~1.2) t₀ = 7.455~8.132 m 则钢板桩的最小入土 深度为t+6.054=13.509~14.186 m。

3.4 钢板桩围堰最小入土深度理论计算与实际采用值比较

综上,钢板桩最小入土深度理论计算值如表2所示,施工实际采用值为14.100m。

由表2 可知: 三种方法计算的钢板桩最小入土深度相差不大,均满足实际施工的需要,施工实践也证 实该围堰的结构是安全的;分别采用空间有限元法、平面有限元法和等值梁法所计算的钢板桩最小入土

深度依次增大,但变化幅度在3.0%以内,由此表明,等值梁法适用于桥梁深水基础钢板桩最小入土深度 的计算 且计算结果偏于安全。

主? 钢板桩是小入十涩度比结

	表2 钢板桩最小入:	上深度比较 m
计算方法	静水压力	静水压力 + 流水压力
空间有限元法	12.986 ~ 13.616	13.182 ~13.830
平面有限元法	13.212 ~ 13.863	13.386 ~14.053
等值梁法	13.325 ~13.986	13.509 ~14.186

结论 4

(1)桥梁深水基础钢板桩围堰的最小入土深度可采用等值梁法计算,其结果偏于安全。

(2) 采用等值梁法计算钢板桩最小入土深度时,对于封底混凝土以下的多层土,可以采取等效土层的 方法计算其对钢板桩的主、被动土压力 从而简化土压力的计算。

参 考 文 献

[1]张琨,钟启凯,戴小松,等. 超厚砂卵石层钢板桩围堰设计与施工[J]. 施工技术,2011,40(3):31-34.

[2] 崔浩. 钢板桩围堰的设计与施工 [J]. 公路, 2008(2): 68-71.

[3]韩跃国,陈永勇,皮海波.永修大桥主墩钢板桩围堰设计与施工[J].铁道标准设计,2008(5):74-77.

[4] 邱训兵. 大型钢板桩围堰施工设计的思考[J]. 铁道建筑, 2005(9): 12-14.

[5]邓潜. 吴淞江大桥主墩钢板桩围堰设计与施工[J]. 施工技术,2005(S1): 230-231.

[6] 张骏. 桥梁深水基础钢板桩围堰受力分析与应用[J]. 桥梁建设, 2012, 42(5): 74-81.

Analysis of the Minimal Embedded Depth of **Steel Sheet Pile Cofferdam for Deepwater Foundation**

Zhang Jun

(Construction Management Office, Shanghai Railway Administration, Shanghai 200071, China)

Abstract: A case study is done for steel sheet pile cofferdam of deepwater foundation for main pier located at the centre of the river in the Hengliaojing Bridge of high-speed railway from Shanghai to Hangzhou. In order to calculate the minimal embedded depth of steel sheet pile , spatial finite element method , plane finite element method and equivalent beam method is used , respectively. Results show that equivalent beam method can calculate the minimal embedded depth of steel sheet pile cofferdam for deepwater foundation , and the result is safer. The minimal embedded depth of steel sheet pile calculated by spatial finite element method, plane finite element method and equivalent beam method increases successively , but the change range is little. Equivalent soil layer method is used to calculate active earth pressure and passive earth pressure for soil layer acting on steel sheet pile under bottoming concrete, when the minimal embedded depth is calculated for steel sheet pile using by equivalent beam method , which can simplify calculation of the earth pressure.

Key words: deepwater foundation; steel sheet pile cofferdam; the minimal embedded depth; finite element method; equivalent beam method

(责任编辑 车轩玉)