



主副格不等长的直腹式格型 钢板桩海墙数值分析

谢锦波

(中交第三航务工程局有限公司, 上海 200032)

摘要: 直腹式格形钢板桩难以避免会出现主副格入土深度不同的情况。依托工程实例, 分析了主副格不等长格形结构的受力特性, 提出了计算中的重点与难点问题。建立三维数值模型对主副格不等长的直腹式格型钢板桩海墙进行稳定性、变形与受力计算, 分析了减小副格入土深度的可行性。结合工程应用提出了一种将主副格不等长的格型钢板桩结构等效为二维模型计算的方法。分析成果对格形钢板桩结构的推广与工程应用具有借鉴意义。

关键词: 格型钢板桩; 主副格不等长; 数值分析; 等效计算

中图分类号: U 656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)02-0131-06

Numerical analysis of straight-web sheet pile cellular seawall structure with unequal main cell and arc cell toe-levels

XIE Jin-bo

(CCCC Third Harbor Engineering Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: It is difficult to avoid the different depths of the main cell and arc cell of straight-web sheet pile cellular into the soil. Based on the engineering example, the mechanical characteristics of the structure with unequal main cell and arc cell length are analyzed, and the key and difficult problems in the calculation are put forward. The three-dimensional numerical model is established to calculate the stability, deformation, and stress of the straight-web sheet pile cellular seawall with unequal main cell and arc cell toe-levels, and the feasibility of reducing the depth of the arc cell sheet pile is analyzed. Combined with the engineering application, a new equivalent calculation method is proposed, which is using a two-dimensional model to calculate the sheet pile cellular seawall with unequal main cell and arc cell toe-levels. The research can be used as a reference for the popularization and engineering application of this structure.

Keywords: sheet pile cellular; unequal main cell and arc cell toe-levels; numerical analysis; equivalent calculation

直腹式钢板桩可施打成闭合的格形形状, 格内填充散体材料形成直立岸壁, 形成半重力式半板桩式的特殊结构, 可用于码头、护岸、围堰等工程^[1]。其结构特点可以适应不同的水深条件、地质情况,

在外海工程中有较好的应用前景^[2]。圆形格体是格型钢板桩结构用于海墙的比较常用的平面布置形式, 见图 1。独立的圆筒结构称为主格(main cell), 主格之间的连接弧段称为副格(arc cell)。

收稿日期: 2020-05-28

作者简介: 谢锦波(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事岩土工程设计与科研。

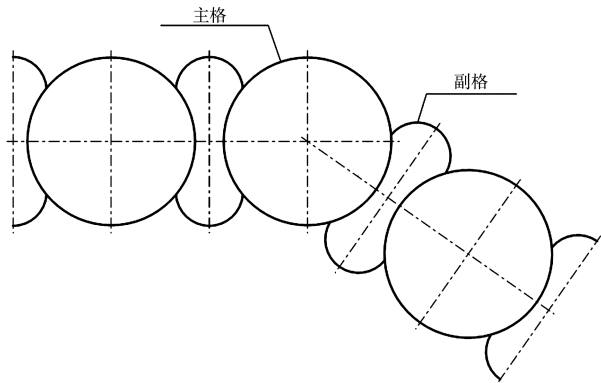


图 1 格型钢板桩平面布置

格型钢板桩海墙在国外已有较多应用，但大多用于土层条件较好的地基中，入土深度有限。国外的计算理论与设计理念中，一般要求格型钢板桩的主格与副格要有相同的入土深度，并在此基础上进行格体平面的等效与简化计算^[3-4]。近年来，由于工程应用的需求，国内很多学者对格型钢板桩结构的计算方法，尤其是在软土地基中的稳定性计算开展了许多研究^[5-7]，也都遵循了主格与副格相同入土深度的假定条件。

但受地质条件与施工工艺的影响，钢板桩施工过程中难以避免会遭遇施工困难^[8]，尤其是两侧主格先行施工后，副格在振沉过程中极易由于土阻力、板桩变形、锁扣拉紧等因素导致副格板桩底高程高于主格。而目前在国内尚未见到相关文献对此现象下格型钢板桩海墙稳定性的研究。

本文依托某海上人工岛工程，针对主副格不等长的直腹式格型钢板桩海墙建立三维数值模型，研究了其稳定性、变形及结构内力。同时，探讨了主副格不等长时格型钢板桩三维结构等效为二维计算的方法，为今后主副格不等长格型钢板桩海墙的计算提供一种思路。

1 工程概况

某海上人工岛工程采用圆形格体结构，主格直径 31.194 m，由 196 块直腹式钢板桩组成；副格直径 15.96 m，单片副格由 46 块直腹式钢板桩组成。格型钢板桩施工完成并内部回填后，海侧抛石形成斜坡堤，陆侧回填后进行堆载预压处理。

海墙结构见图 2。

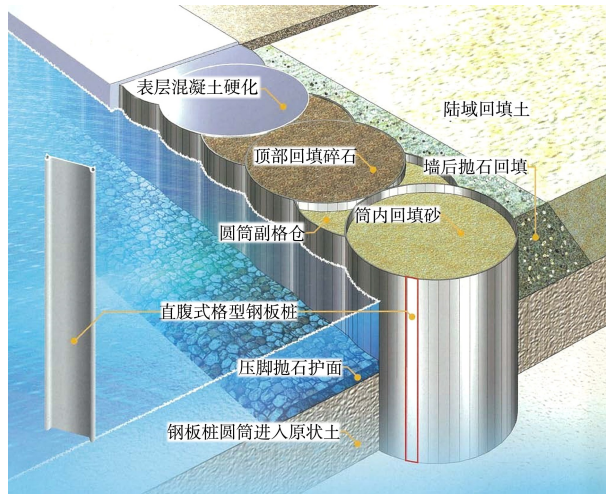


图 2 格型钢板桩结构

工程所在海域平均水深约 10 m，海床面以下分布厚度 18~27 m 的沉积层，主要为淤泥质土，浅层土含水率达到 100%，不排水抗剪强度不足 5 kPa。沉积层以下为冲积硬黏土或砂土。本工程格型钢板桩须穿透深厚软土层，设计桩长最长达 37.1 m，钢板桩底部进入下卧冲积层硬土深度普遍超过 5 m。

施工现场采用先施工主格并回填、后施工副格的工序。由于钢板桩进入较硬的冲积土层的深度很大，主格施工完成并内部回填后存在一定的变形。实际施工中，副格不仅打入冲击土层难度较大，而且要顺应主格已有变形、保持锁口完整更具有难度，强行振动下沉甚至有锁扣撕裂的风险。在此背景下，需要对副格入土深度小于主格的格型钢板桩海墙稳定性、变形及受力情况进行评估。

2 主副格不等长格形结构的受力特性

格型钢板桩海墙由 3 部分组成：主格筒体、副格以及用来连接二者的锁口，主格筒体和副格通过锁口连接形成整体，抵御两侧水土侧压力，保持墙身协调变形。

在整个受力和协调变形过程中，主格筒体的刚度远大于副格，从而承担大部分侧向压力。而副格的作用主要有两方面：一是将侧向水土压力

传递给主格筒体，并使两边的主格筒体变形协调；二是副格平面范围内的挡土、挡水作用。根据副格在海墙中承担的作用看，在副格底部进入土质较好的硬土层前提下，适当减小副格入土深度的同时不影响围堤的稳定性，理论上存在可能性的。

但是主副格不等长格形结构的设计计算仍然存在一定难度，主要体现在两方面：1) 对钢板桩入土深度的确定，常规的设计理论假定将围堤作为一个整体，稳定性计算一般采用平面应变假设，将结构和土简化为二维平面模型，采用有限元法或弹性地基梁法进行计算，滑移面通过圆筒的两趾。如果主格、副格的入土深度不同，破坏面不好确定，并且短副格下部土体的变形情况、格形结构受力情况也需要重点关注。2) 从工程应用角度，需要利用格型钢板桩的连续、对称结构特点，采用面积等效等方法将计算模型简化，以满足不同地质与边界条件的大量计算需求。但是如果主格、副格采用不同长度，就是一个空间问题，难以通过二维平面假设来进行计算。

3 三维有限元分析

3.1 三维有限元模型

根据主副格不等长格形结构的受力特点，其适用条件要结合主副格尺寸、地质条件、格体内外回填土等因素，综合考虑海墙稳定性与变形、格体结构受力以及短副格的挡土作用。考虑到实际施工副格底部已进入土质良好的冲积土层的情况，拟通过数值分析手段对施工工况的可行性进行验证。

由于主副格不等长的格型钢板桩结构的空
间受力特点，须采用三维有限元模型模拟海墙稳定性及结构受力情况。三维计算采用 ABAQUS 有限元软件，选取副格及两侧各半幅主格建立数值模型。模型左右两侧采用对称边界，格形大圆筒采用壳体单元，土体采用实体单元与库仑摩擦模型。假设土体与格形圆筒接触面既可以相互作用又能发生相对位移。三维模型中海墙岸侧的堆载采用施加施工荷载的方式进行模拟。结合实际施工的边界条件，模型中考虑主格长度为 27.5 m，副格长度为 20.0 m，钢板桩材料参数 E 为 212 GPa，泊松比为 0.31。有限元模型和结构模型见图 3、4。数值模型中土体参数见表 1。

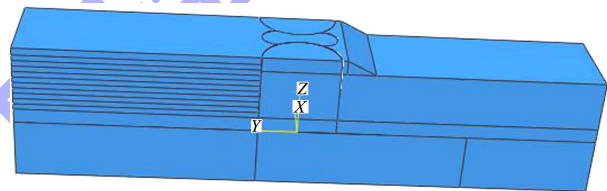


图 3 三维计算有限元模型



图 4 格型钢板桩结构模型

表 1 土体计算参数

土体	密度 $\rho/(\text{t} \cdot \text{m}^{-3})$	黏聚力 C'/kPa	内摩擦角 $\varphi'/(^\circ)$	不排水强度 S_u/kPa	压缩模量 E/MPa
块石	2.0	0	42	—	50
陆上填料	1.9	0	32	—	20
回填砂	1.9	0	30	—	20
沉积层	1.5	—	—	5 ($Z < 3 \text{ m}$) 1.7+1.1Z ($Z > 3 \text{ m}$)	400 S_u
冲积砂层	1.9	1	28	—	25
冲积黏土	1.9	—	—	65+2.5Z	400 S_u

注：Z 为深度(m)。

3.2 稳定性计算

采用强度折减法进行稳定性计算，三维模型破坏模式见图 5，此时对应的安全系数为 2.04。

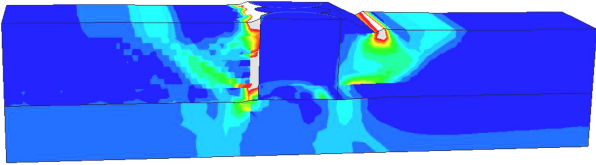


图 5 三维稳定性计算破坏模式

3.3 变形计算

水平位移云图见图 6，最大水平位移为 300 mm。副格截面处水平位移云图见图 7，由图 7 可知，因为副格入土深度较小，土体发生轻微侧向变形，所以在筒内陆侧土体位移反而比主格内小，而在筒内靠近海侧位移较主格内土体位移大。总体上来讲，副格长度在 20 m 的时候，对整体挡土效果没有明显减弱。

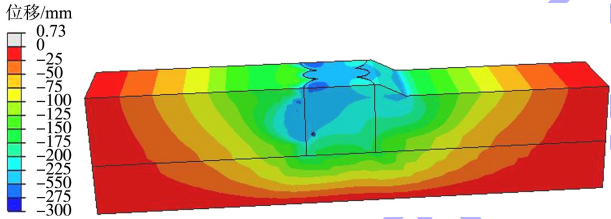


图 6 整体水平位移云图

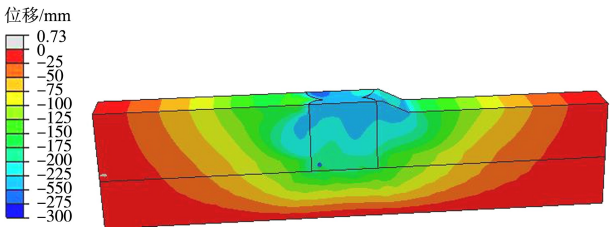
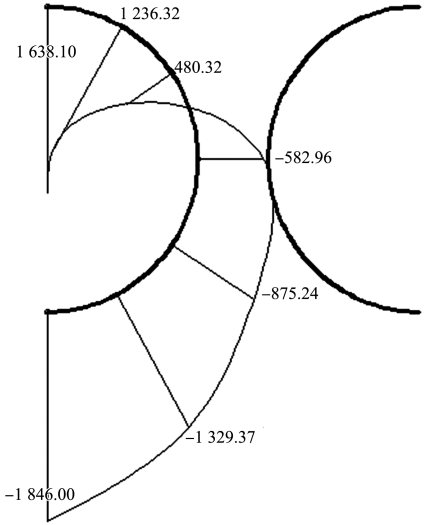


图 7 副格截面处水平位移云图

3.4 结构受力

对钢板桩的环向应力进行分析，以验算钢板之间的锁口强度。由上至下，分别提取各个深度格形结构的环向应力，图 8 是最不利深度 27 m 处计算结果。



注：“+”表示压应力，“-”表示拉应力。

图 8 27 m 处环向力分布（单位：kN/m）

3.5 短副格下部土体位移

额外需要关注的是副格下方、岛内侧的土体是否因岛内填筑的土压力作用而被挤出。根据三维数值模拟结果，副格下方、墙后的土体在土压力作用下出现向墙前移动、涌入两边圆筒之间狭缝的趋势，但圆筒墙后形成了局部拱效应，因此土体与结构之间没有出现明显的相对位移(图 9)。

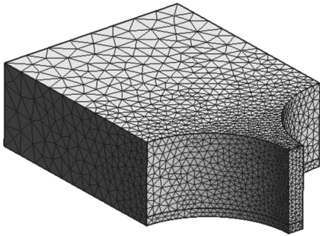


图 9 副格下方、墙后土体位移网格

4 二维等效计算

格型钢板桩结构在工程设计时常采用面积等效法将计算模型简化为二维平面模型。对于主副格不等的长格型结构，也需要考虑其结构与受力特点，研究其在水平荷载作用下结构刚度的等效方法，以满足不同地质断面稳定性计算的需要。

4.1 等效方法

首先将钢板桩等效为二维的板单元，圆筒的环向作用等效为二维横撑及斜支撑，建立二维等

效结构模型的关键在于获得支撑刚度(图 10)。对于主格与副格入土深度不同的情况,可根据环向抗拉刚度相同的原则,以副格底高程为界分别等效计算水平支撑的上、下两种刚度。

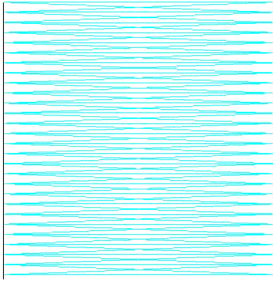


图 10 等效二维模型

水平支撑刚度 k_{hoop} 计算采用如下公式:

$$k_{hoop} = \frac{\frac{EA}{R^2}}{\frac{x}{D}} = \frac{2EA}{xR}$$

(1)

式中: E 为钢材弹性模量; A 为钢板桩横截面积; R 为主格半径; x 为主格间距; D 为主格直径。

其次通过三维结构与二维结构在侧向压力作用下的对比计算,按照三维与二维模型水平向刚度等效的原则拟合确定斜撑刚度,计算过程见图 11~13。在等效计算时,模型底部采用固定约束,顶部约束转动。

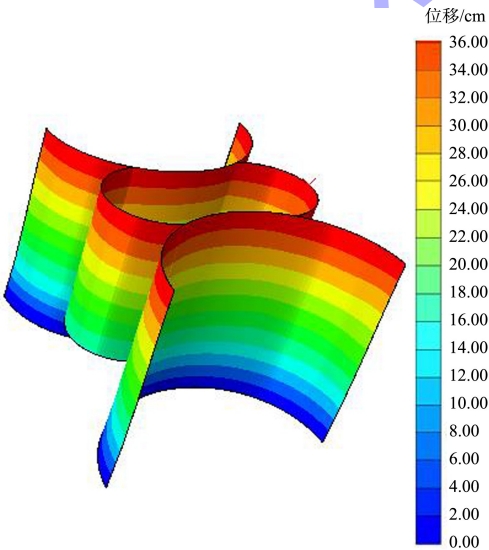


图 11 三维模型水平位移云图

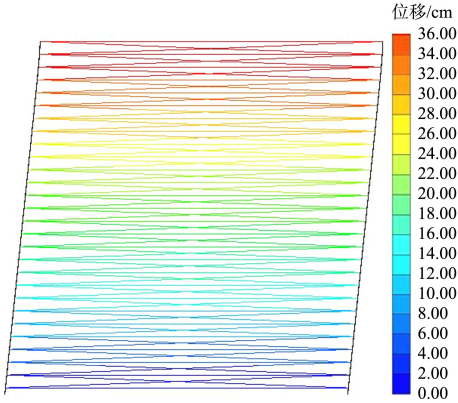


图 12 二维模型水平位移云图

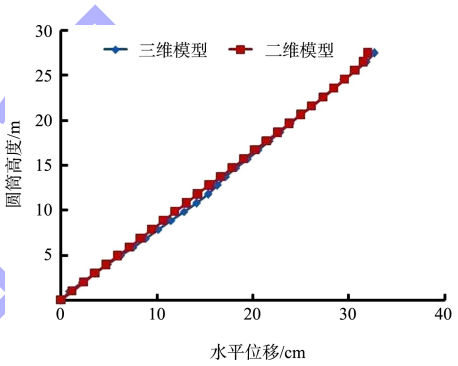


图 13 水平位移拟合曲线

4.2 二维有限元模型

等效计算确定二维数值模型结构参数后,采用 Plaxis 软件建立二维有限元分析模型,钢板桩与等效计算时的模型一样采用板单元,土体采用摩尔库仑模型,见图 14。计算工况与各项土体参数与三维计算相同。格形钢板桩采用板单元,土体采用实体单元,土与结构之间的接触面采用界面单元,并通过设置界面强度与厚度来模拟不同类型土体与结构的相互作用。

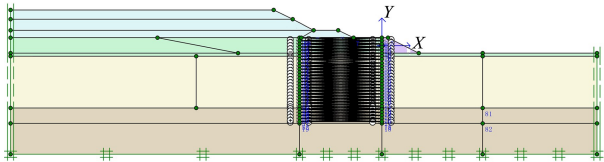


图 14 二维有限元计算模型

4.3 稳定性分析

采用强度折减法进行二维数值模型的稳定性计算,破坏模式见图 15,对应的安全系数为 2.0,与三维有限元分析结果相符合。

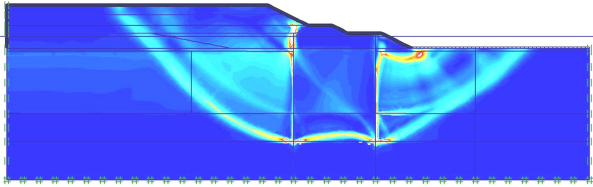


图 15 二维强度折减法破坏模式

5 结论

1) 针对直腹式格形钢板桩受地质条件、施工工艺等因素影响出现的副格入土长度小于主格的情况,本文分析了主副格不等长格型结构的受力特性,提出了设计计算中的难点问题。

2) 建立三维数值模型对主副格不等长的直腹式格型钢板桩海墙进行计算,结果表明适当减小副格的入土深度对整体挡土效果没有明显减弱,圆筒墙后形成了局部拱效应限制了短副格下方土体的位移;结构变形及受力均处于可控状态。

3) 为了满足工程应用时不同工况的计算需求,在面积与刚度等效法基础上,提出一种将格形圆筒环向作用等效为二维支撑,通过侧向压力作用下水平向刚度等效原则的三维与二维模型等效方

法。针对主副格不等长,采用副格底高程为界的上下不同水平支撑刚度,按照水平位移拟合原则确定了斜撑刚度。在此基础上,采用强度折减法进行二维数值模型的稳定性分析,为格型钢板桩海墙结构在特殊条件下的应用提供了参考。

参考文献:

[1] 毛铠.格型钢板桩结构设计施工手册[M].北京: 中国计划出版社,1996: 18-89.

[2] 吴哲丰,卓文雅.格型钢板桩在特大型跨海桥梁人工岛中的应用[J].水运工程,2011(S1): 39-42, 51.

[3] 新日本制铁株式会社.Manuel of design and construction for cellular-bulkhead structure[M]. Tokyo: 新日本制铁株式会社 2002: 5-16.

[4] 王元战,郭富林.格型钢板桩结构计算方法[J].港工技术,2013,50(6): 21-27.

[5] 王元战,焉振,王禹迟.格型钢板桩结构有限元数值分析[J].岩土力学,2013,34(4): 1163-1170.

[6] 王元战,郭富林,刘旭菲,等.格型钢板桩结构抗倾覆稳定性与地基承载力的计算方法[J].港工技术,2013,50(2): 32-35, 42.

[7] 王婷婷,陈良志,李建宇.格型钢板桩与复合地基组合式岛壁稳定性研究[J].水运工程,2019(1): 173-178.

[8] 李海泉,陈健.冲积黏土对格型钢板桩振沉施工的影响[J].水运工程,2016(2): 159-161.

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 92 页)

4) 该升船机驱动系统各设备中,电气传动设备、传感检测装置等电气设备的运行可靠度,投运后的第 2 年比第 1 年有较大提高,但第 3 年有所下降。下阶段要重点加强电气传动设备、传感检测装置的检查维护和优化完善,提高电气设备的运行可靠性。

参考文献:

[1] 水利部水利水电规划设计总院,长江勘测规划设计研究院.升船机设计规范: GB 51177—2016[S].北京: 中国计划出版社,2016.

[2] 钮新强,宋维邦.船闸与升船机设计[M].北京: 中国水利水电出版社,2007.

[3] 宣国祥,张瑞凯,宗慕伟.船闸运行可靠性分析[J].水利学报,1996(1): 1-7.

[4] 须清华,张瑞凯.通航建筑物应用基础研究[M].北京: 中国水利水电出版社,1999.

[5] 冒刘燕,余向阳,成虎.基于维修事件信息的船闸可靠性分析[J].河海大学学报(自然科学版),2017,45(2): 175-181.

[6] 李明,周维.三峡升船机锁定机构单点保压失效时小齿轮受力变化[J].水运工程,2020(2): 169-171.

[7] 李葆文.现代设备资产管理[M].北京: 机械工业出版社,2006.

[8] 金锋,王卫东,江蓓.枢纽通航现代化管理指标评价方法[C]//中国航海学会.中国航海科技优秀论文集 2015.上海: 上海浦江教育出版社,2016: 533-548.

(本文编辑 王璁)