

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.01.002

软土地基大直径格形钢板桩围堰设计探讨

李锦辉¹, 宋磊¹, 肖忠², 马驰³, 张利民⁴

(1. 哈尔滨工业大学(深圳), 深圳 518055; 2. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072;
3. 中国铁道科学研究院深圳研究设计院, 深圳 518055; 4. 香港科技大学 深圳研究院, 深圳 518000)

摘要: [目的]大直径格形钢板桩围堰作为一种新型的围堰形式, 不仅施工速度快, 而且能够有效减少施工过程对海洋环境的污染。但目前软土地基中大直径格形钢板桩围堰的设计方法还存在不足。[方法]以我国某人工岛大直径格形钢板桩围堰为例, 分别利用我国规范法、日本规范法和三维有限元弹塑性分析方法, 对软土地基中大直径格形钢板桩围堰的稳定性问题进行了探讨。[结果]研究表明: 中国规范法计算得到的格外土体主、被动土压力小于日本规范法和有限元数值法。中国规范法假设大直径格形钢板桩围堰在倾覆破坏过程中结构旋转中心为格形钢板桩底部的前趾, 而日本规范法和有限元数值法计算结果显示旋转中心位于格形钢板桩底部的非倾覆侧。不同旋转中心的选取方法导致了中国规范法计算的抗倾覆稳定性安全储备明显大于另外两种方法。[结论]研究成果说明大直径格形钢板桩围堰在软土地基中的设计理论和方法还需进一步的研究和探讨。

关键词: 大直径格形钢板桩围堰; 规范法; 三维弹塑性有限元法; 安全系数; 旋转中心

中图分类号: U445.55

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2019)01-0008-05

Design of Large Diameter Cellular Sheet Pile Cofferdam in Soft Clay

LI Jinhui¹, SONG Lei¹, XIAO Zhong², MA Chi³, ZHANG Limin⁴

(1. Shenzhen Graduate School, Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055, China;
2. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
3. Shenzhen Research and Design Institute, China Academy of Railway Sciences, Shenzhen 518055, China;
4. Shenzhen Research Institute, Hong Kong University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China)

Abstract: [Introduction] Large diameter cellular sheet pile cofferdam has been applied in practice recently due to the advantage of construction speed and less pollution to the environment. However, the design method of this cofferdam in soft clay is still in its infant. [Method] Taking a large diameter cellular sheet pile cofferdam in an artificial island project in China as an example, this study focused on the potential problems in its design in soft clay. Three different methods were used to calculate the stability of the cofferdam. These methods included China's code method, Japan's code method and three-dimensional finite element method. [Result] The results show that the earth pressures of foundation calculated by China's code method are smaller than that of the other two methods. The overturning point is located at the un-overturning side of the cofferdam based on the results of Japan's code method and the finite element method, whereas it is fixed at the front toe point of the cofferdam in China's code. The safety factor of overturning failure by China's code method is larger than that of the other two methods due to the different positions of the overturning points. [Conclusion] This showed that more work of the design code method and theory should be conducted on large diameter cellular sheet pile cofferdam in soft clay foundation.

Key words: a large diameter cellular sheet pile cofferdam; code method; three dimensional finite element method; safe factor; overturning point

收稿日期: 2018-09-06 修回日期: 2019-01-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目“复杂海洋土中桩靴基础在多元荷载共同作用下的失效机理和承载力包络面研究”(51679060)

大直径格形钢板桩围堰作为一种新型的海洋围堰形式, 由于具有施工速度快、适用于复杂海床地基条件和能够有效减少施工过程对海洋环境污染等优势, 已经受到越来越多的关注^[1-2]。目

前我国针对这种新型围堰的设计规范为 2018 年颁布的《码头结构设计规范》(JTS 167—2018)^[3], 此规范主要适用于地基为砂土的情况。我国沿海地区海床普遍分布着深厚的淤泥软土层^[4-7], 目前适用于砂土地基的大直径格形钢板桩围堰设计方法是否能用于分析软土地基中的破坏机理还存在争议, 这也导致了实践中工程事故时有发生。例如港珠澳大桥香港口岸人工岛采用大直径格形钢板桩围堰, 由于没有充分考虑香港口岸海床中存在的深厚软土层, 导致施工过程中部分钢板桩围堰发生了高达 7 m 的水平位移。实际工程中为了克服上述问题, 往往采用清除海底淤泥层, 然后砂土回填的方法^[8-9]。此方法不仅造成了建造成本的大幅增加, 而且清淤过程对海洋环境也会造成严重污染。所以亟需一种适用于深厚软土地基中大直径格形钢板桩围堰的设计方法。

目前美国、日本等发达国家已经对格形钢板桩围堰开展了深入的研究和应用, 并且也分别颁布了相应的设计规范。美国的 EM 1110-2-2503 规范主要考虑了格形钢板桩围堰在砂土地基中的受力机理和破坏模式^[10], 而日本设计规范虽然也只适用于砂土地基^[11], 但相对于美国 EM 1110-2-2503 设计规范, 日本规范对格形钢板桩围堰受力机理和破坏模式的分析更加合理, 现已成功用于日本名古屋、小松岛港以及关西国际机场等工程^[12]。我国关于格形钢板桩围堰设计方法的研究开始比较晚, 最早的格形钢板桩围堰设计手册为毛凯 1996 年出版的《格形钢板桩结构设计施工手册》^[1]。伍晓峰等^[13]针对格形钢板桩围堰抗倾覆稳定性验算提出了一种新方法, 但其也只适用砂土地基。郭富林等^[14]基于无锚板桩稳定性理论提出了格形钢板桩围堰在软土地基中的设计方法, 此方法采用传统朗肯土压力理论计算地基土压力, 计算误差较大, 其适用性还需进一步研究。

为了研究大直径格形钢板桩围堰在深厚软土地基中的设计方法, 本文首先利用能够充分考虑结构空间几何和受力特性的三维有限元分析方法对我国某人工岛工程软土地基中大直径格形钢板桩围堰的受力机理和破坏模式进行分析; 采用我国《码头结构设计规范》(JTS 167—2018) 和国际上较为成熟的日本格形钢板桩围堰设计规范分别计算大直径格形钢板桩围堰在软土地基中的结构稳定性。通过数值

方法和规范方法计算结果的对比, 研究影响大直径格形钢板桩围堰稳定性的关键参数, 从而为提出适用于深厚软土地基中的大直径格形钢板桩围堰设计方法提供理论依据。

1 数值方法

本文大直径格形钢板桩围堰以我国某人工岛围堰工程为原型^[12], 人工岛围堰由大直径格形钢板桩主格和副格交替连接而成, 主、副格是由多个直腹式钢板桩拼接而成的封闭格体, 大直径格形钢板桩围堰实物图如图 1 所示。大直径格形钢板桩围堰主格直径为 24.848 m, 高度为 38.5 m, 入土深度为 9 m, 地基土体从上到下分别为软黏土, 土层厚 9 m, 粉质黏土夹砂, 土层厚 10 m 和层厚 40 m 的中砂, 土体参数如表 1 所示。为了简化计算, 本文选取人工岛围堰中具有代表性的单元体进行分析, 根据对称性原则选取轴线 L2 与 L4 之间的部分作为代表性单元体, 结构计算断面如图 2 所示。为了消除模型边界效应, 模型两侧土体长度取大直径格形钢板桩围堰中心线 L1 两



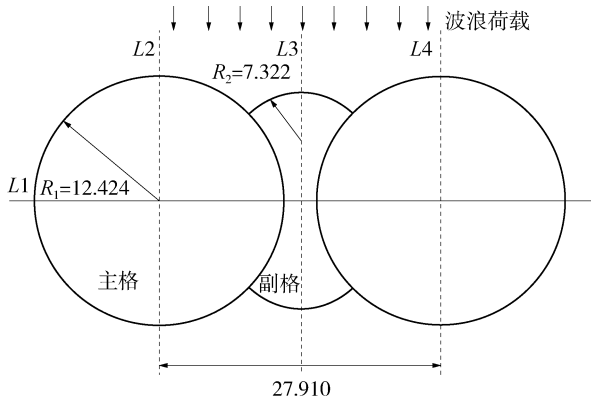
图 1 大直径格形钢板桩围堰实物图

Fig. 1 Large diameter cylindrical sheet pile cofferdam

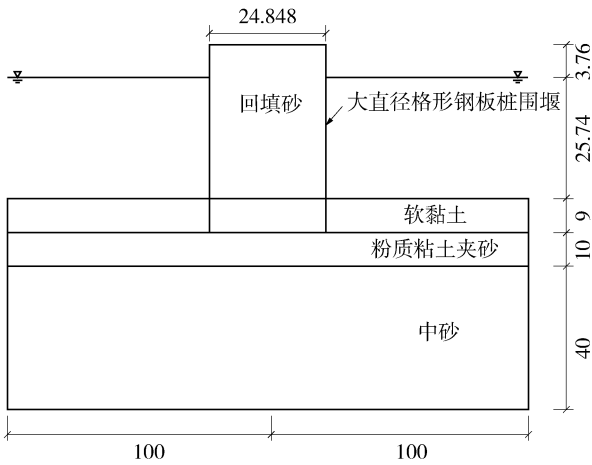
表 1 土体基本参数

Tab. 1 Fundamental properties of the soils

土体	密度 /(kg·m ⁻³)	杨氏模 量/MPa	泊松 比	摩擦角 /(°)	剪胀角 /(°)	粘聚力 /kPa
回填砂	1 800	14	0.30	32	16	0
软黏土	1 500	2	0.49	8	0	4
粉质黏土 夹砂	1 830	5	0.30	28	14	22
中砂	2 050	14.3	0.30	35	18	9
钢板桩	393/343(浮)	1e4	0.30	—	—	—



(a) 围堰平面图
(a) Plan of the cofferdam



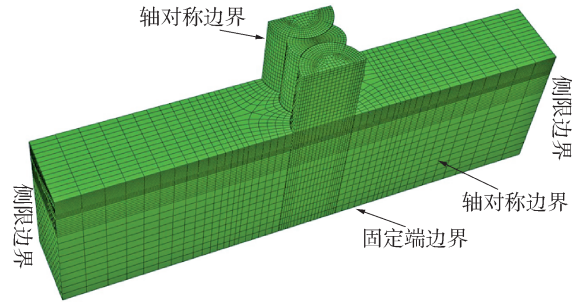
(b) 围堰立面图
(b) Front view of the cofferdam

图2 大直径格形钢板桩围堰计算断面(单位:米)

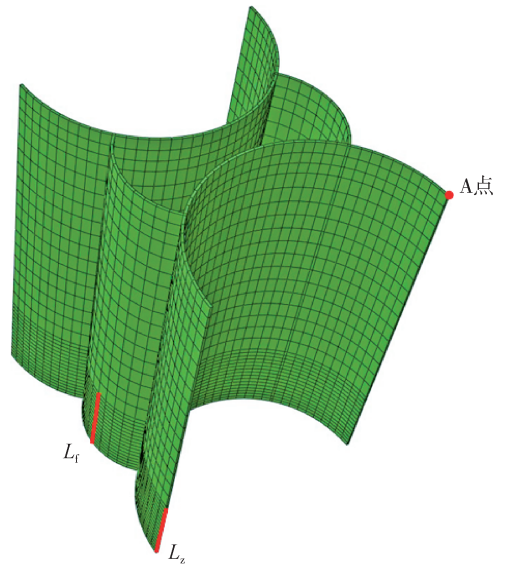
Fig. 2 Large diameter cylindrical sheet pile cofferdam schematic diagram (Unit: m)

侧各 100 m, 结构立面图如图 2(b) 所示。本文选取大直径格形钢板桩围堰刚完成格内回填时作为验算阶段, 根据事故数据统计此时大直径格形钢板桩围堰处于结构稳定的危险阶段^[15-16]。此时格体内外海水高度相同, 结构受波浪荷载作用。水文条件选用 10 年一遇的水位, 设计高水位为 2.74 m, 设计波高为 3.7 m, 波浪周期为 8.7 s, 格体前水深为 25.74 m, 波浪荷载采用我国《海港水文规范》(JTS 145-2—2013) 进行计算^[17]。

本文利用大型有限元软件 ABAQUS 对大直径格形钢板桩围堰进行了三维弹塑性有限元分析。大直径格形钢板桩围堰有限元模型如图 3 所示, 土体与格形钢板桩单元类型选为三维 8 节点减缩积分实体单元。实际工程中格形钢板桩结构由多个直腹式



(a) 土体模型
(a) Finite element model of soil



(b) 格形钢板桩模型
(b) Finite element model of the cylinder sheet pile

图3 大直径格形钢板桩围堰数值模型

Fig. 3 Finite element model large diameter cylindrical sheet pile cofferdam

钢板桩相互拼接而成, 而本文将格形钢板桩结构简化为整体模型, 根据王元战等^[18]的研究成果得出这种简化对计算结果影响不大, 但能显著提高建模效率和计算收敛性。模型边界条件如下: 地基地面为固定边界, 左侧面和右侧面为侧限边界, 前侧面和后侧面为对称边界, 地基表面为自由边界。土体采用莫尔-库伦本构模型, 单元网格划分技术分别采用了结构化网格划分技术和扫略网格划分技术。钢板桩与土体的接触关系为: 法向为硬接触, 切向为罚函数, 这既能使钢板桩与土体间产生相对滑动, 又能使格形钢板桩与土体在变形过程中产生相互作用。分析步骤包括以下三步: (1) 对格内土体和地基土体进行地应力平衡, 从而获得土体的初始应力; (2) 施加格形钢板桩重力; (3) 在格形钢板

桩迎浪侧施加静力水平波浪荷载, 并逐级增加荷载, 计算出荷载大小与结构位移间的关系, 然后根据计算结果绘制格形钢板桩围堰上控制点 A (如图 3 所示) 的荷载-位移曲线。根据塑性理论, 当荷载-位移曲线斜率接近于 0 时, 施加很小荷载能产生很大位移, 结构失稳破坏, 此时结构达到极限状态。根据极限荷载与设计荷载的比值定义结构稳定性安全系数^[12, 18-19]。

2 规范方法

已有研究成果表明由于软黏土地基强度较弱, 大直径格形钢板桩围堰的破坏模式主要为倾覆破坏^[20]。因此本文针对结构抗倾覆稳定性分别采用我国规范法和日本规范法进行验算分析。

2.1 我国规范法

根据《码头结构设计规范》(JTS 167—2018) 对大直径格形钢板桩围堰的抗倾覆稳定性进行验算, 将大直径格形钢板桩围堰视为重力式结构, 基于可靠度理论, 考虑荷载分项系数和结构重要性系数。要求格体重力、格外土体被动土压力和格外土体与钢板桩间摩擦力对旋转中心的稳定力矩大于格外荷载和格外土体主动土压力对旋转中心的倾覆力矩。倾覆过程中结构旋转中心选为格形钢板桩底部的前趾。格外泥面以下地基土体主动土压力系数采用库伦土压力理论计算, 而被动土压力系数取为定值 1, 钢板桩与土体间的摩擦系数为 $0.5 \tan \varphi$, 其中 φ 为土体的内摩擦角。

2.2 日本规范设计法

日本规范中大直径格形钢板桩围堰的抗倾覆稳定性验算假设迎浪侧地基土体的主动土压力系数为 0.5。而被动土压力的计算则引入了弹性地基反力概念, 被动土压力等于土体弹性位移乘以土体的水平抗力系数。日本规范中只规定了砂土的水平抗力系数与标准贯入度有关, 而针对软黏土水平抗力系数如何取值没有相关规定。本文为了计算软黏土的被动土压力, 根据我国《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330—2013) 中关于板桩式挡墙设计中软黏土地基系数的规定进行取值^[21]。地基土体的水平弹性位移则根据结构的旋转中心位置和旋转角度进行计算。格外土体与钢板桩间由主动和被动土压力产生的竖向摩擦力, 数值上等于相应土压力乘以摩擦系数 $\tan(0.5\varphi)$, φ 为土体的内摩擦角。围堰底部

地基反力和剪切力等于相应弹性位移乘以相应地基反力系数。地基地部的压缩位移和剪切位移根据结构的旋转中心位置和旋转角度进行计算。最后根据受力条件建立大直径格形钢板桩围堰水平力、竖向力和对旋转中心力矩的平衡方程确定围堰的旋转中心位置和旋转角。最后将结构顶部水平位移和入土深度之比作为控制值, 日本规范允许变位的控制值为 0.15%。结构达到允许变位控制值的荷载视为极限荷载, 定义结构抗倾覆稳定性安全系数为极限荷载与设计荷载的比值。

3 结果分析

3.1 有限元模型验证

为了验证数值模型的准确性, 本文将数值模型中表层地基土体类型由软黏土换成砂土, 其他条件保持不变。利用上述数值计算方法分析了砂土地基中大直径格形钢板桩围堰的稳定性安全系数。然后将有限元数值结果与目前在砂土地基大直径格形钢板桩围堰稳定性验算中比较成熟的日本规范法计算结果进行对比。数值结果显示砂土地基中结构稳定性安全系数为 4.77, 日本规范法结果为 4.55, 误差为 4.6%, 二者计算结果比较接近。同时本文也将大直径格形钢板桩围堰在软土地基发生倾覆破坏过程中结构的旋转中心位置(如图 4 中 O_N 所示)与王元战^[22]等研究的筒型基础在软土地基的倾覆旋转中心位置进行对比, 二者都靠近格形钢板桩后趾, 因此本文所建数值模型是可靠的。

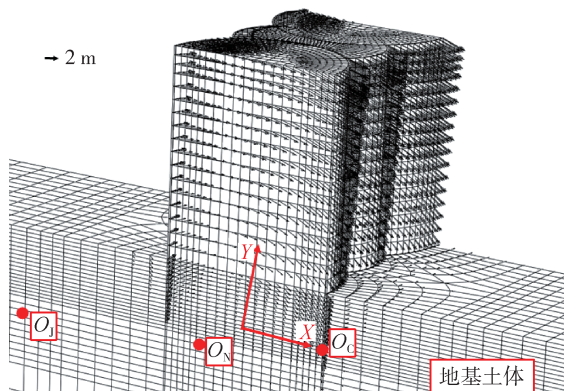


图 4 倾覆破坏中大直径格形钢板桩围堰位移矢量图
Fig. 4 Displacement vector diagram of the cofferdam in overturning failure model

3.2 地基土压力

规范法只能计算平面内土压力的分布规律, 而

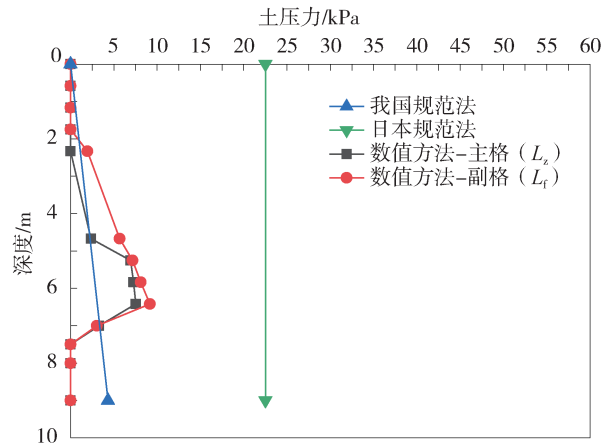
格形钢板桩围堰具有显著的空间受力特性，所以格形钢板桩主、副格外的土压力分布规律需要分别考虑。格外土体为大直径格形钢板桩外侧泥面以下至格形钢板桩底部的土体。格形钢板桩主格和副格的形状都为圆弧面，本文选取了圆弧面中受力最大的两处(如图3中 L_z 和 L_r)的土压力进行分析。图5描述了大直径格形钢板桩围堰在软黏土地基中分别采用规范法和有限元数值法计算得到的格外迎浪侧和背浪侧土抗力随地基土体深度的变化规律。从图5(a)中可以得出采用规范法得到的格外迎浪侧土体主动土压力随地基深度呈线性分布，日本规范法主动土压力明显大于我国规范法主动土压力。有限元数值法中主、副格外迎浪侧土抗力随地基深度变化呈现显著的非线性特征，土抗力最大值出现在格形钢板桩底部以上三分之一位置，主格外迎浪侧地基土抗力略小于副格外土抗力。从图5(a)中还可以得出有限元数值法得到的迎浪侧土抗力大部分处在我国规范法和日本规范法之间。从图5(b)中可以得出规范法计算的格外背浪侧土压力都呈线性分布，而有限元数值法得到格外背浪侧土抗力呈非线性分布。

3.3 倾覆旋转中心

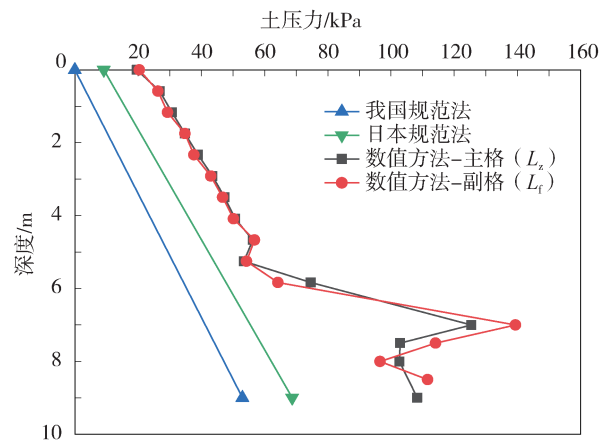
大直径格形钢板桩稳定性分析中倾覆旋转中心的选取对结果至关重要。目前关于大直径格形钢板桩围堰倾覆稳定性分析中倾覆旋转中心的选取问题还存在分歧。日本规范法中倾覆旋转中心的确定需要根据大直径格形钢板桩围堰的受力情况，建立结构水平方向和竖直方向力的平衡，针对旋转点的力矩平衡方程求得倾覆旋转点的位置，如图6所示。

当格形钢板桩围堰的位移达到允许变位的限值(0.15%)时，结构旋转中心位置如图4中的点 O_1 所示。我国规范法将大直径格形钢板桩围堰的旋转中心选为格形钢板桩围堰底部的前趾点，如图4中点 O_C 所示。图4描述了大直径格形钢板桩围堰在极限荷载作用下有限元数值法的结构位移矢量云图，从图4中可以得出大直径格形钢板桩围堰的位移矢量云图呈圆弧形分布，从而可以得出大直径格形钢板桩围堰发生了以地基中某点为旋转中心的倾覆破坏。本文根据有限元数值方法结果，将土体位移矢量云图中位移为零的点作为旋转中心，如图4中点 O_N 所示。

有限元数值法和规范法得到的大直径格形钢板



(a) 主动土压力
(a) Active soil pressure



(b) 被动土压力
(b) Passive soil pressure

图5 土压力计算结果对比

Fig. 5 Comparison of soil pressure result

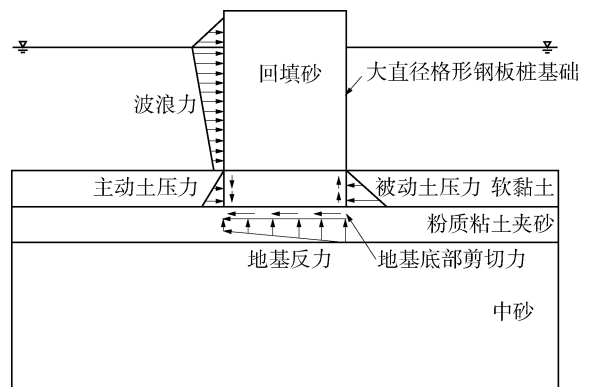


图6 日本规范法受力机理图

Fig. 6 Mechanical diagram of the cofferdam in Japan code

桩围堰在软黏土地基中发生倾覆破坏时结构旋转中心的坐标如表2所示，坐标轴方向如图4所示，坐

标原点为格形钢板桩底部与中心轴线的交点。从表 2 中可以得出数值方法和日本规范法得到的旋转中心都位于大直径格形钢板桩围堰底部以下的非倾覆侧, 而我国规范中旋转中心的位置位于倾覆侧。由于日本规范法计算的结构极限荷载小于本文工况条件下的设计荷载, 所以表 2 中日本规范法中设计荷载作用下的旋转中心坐标没有列出。

表 2 大直径格形钢板桩围堰倾覆破坏旋转中心位置

Tab. 2 Overturning center of the cofferdam in the overturning failure model

计算方法	旋转中心位置 [X, Y] / m	
	设计荷载作用下	极限荷载作用下
有限元数值法	-5.47, -10	-5.47, -9
日本规范法	*	-86.91, -4
我国规范法	12.42, 0	12.42, 0

注: * 指此工况下极限荷载小于结构的设计荷载。

3.4 倾覆破坏安全系数

根据我国规范本文格形钢板桩围堰在软土地基中的稳定力矩为 $63.711 \text{ MN} \cdot \text{m}$, 倾覆力矩为 $24.199 \text{ MN} \cdot \text{m}$, 稳定力矩为倾覆力矩的 2.63 倍。日本规范法规定当格形钢板桩结构顶部水平位移和入土深度之比达到允许变位控制值 (0.15%) 时倾覆荷载与设计荷载的比值为结构抗倾覆破坏安全系数。有限元数值法中结构抗倾覆破坏安全系数需要通过大直径格形钢板桩围堰 A 点 (如图 3 所示) 的荷载-位移曲线得出, 如图 7 所示。从图 7 中可以看出格形钢板桩围堰顶部 A 的水平位移随着荷载的增大而增大, 位移增大速率逐渐减小。当水平位移增大速率逐渐接近于零时, 结构水平位移为 2.6 m, 施加荷载与设计荷载的比值为 1.37。根据结构破坏准则可以得出结构在软黏土地基中抗倾覆破坏安全系数为 1.37。表 3 总结了大直径格形钢板桩围堰在软土地基中分别采用有限元数值法和日本规范法计算得到的抗倾覆稳定性安全系数和结构极限承载力。规范法中结构极限承载力数值等于稳定性验算安全系数乘以设计荷载。从表 3 中可以得出结构抗倾覆稳定性验算中日本规范法计算的结构稳定性安全系数明显小于数值模拟结果, 甚至小于 1, 主要原因为地基抗力系数法不适用于软黏土土压力的计算。我国规范法计算的结构抗倾覆稳定性安全储备明显大于日本规范和数值方法, 这是由于我国规范

法中将格形钢板桩底部前趾 (图 4 中 O_c 点) 作为旋转中心, 结构重力荷载视为结构抗力, 而在数值方法和日本规范法中, 结构旋转中心位于结构非倾覆侧, 结构重力荷载提供倾覆力矩。因此说明我国规范法确定结构旋转中心的方法不适用于地基为软黏土的情况。

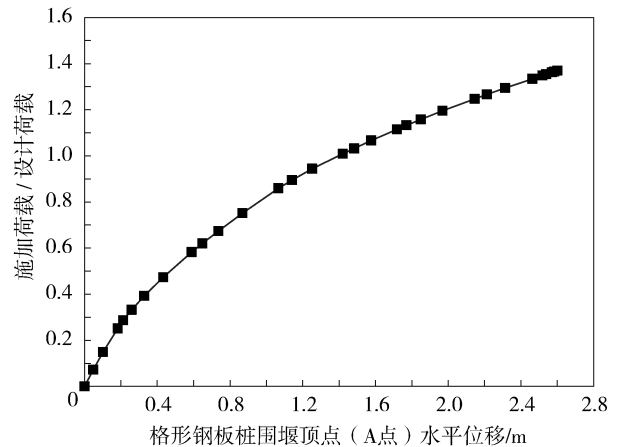


图 7 大直径格形钢板桩围堰荷载-位移曲线

Fig. 7 Displacement-Force curve of the cofferdam

表 3 大直径格形钢板桩围堰的抗倾覆稳定性与极限承载力

Tab. 3 Bearing capacity and safety factor of the cofferdam

计算方法	抗倾覆稳定性	极限承载力 / ($\text{kPa} \cdot \text{m}^{-1}$)
有限元数值法	1.37	824
日本规范法	0.33	20

4 结论

本文通过对我国某人工岛大直径格形钢板桩围堰分别采用我国规范法、日本规范法和有限元数值法三种方法验算了抗倾覆稳定性安全系数和格外土体主、被动土压力沿地基深度的分布规律, 通过计算结果的对比, 研究了我国规范法对大直径格形钢板桩围堰在深厚软黏土地基条件下的适用性。主要结论如下:

1) 通过将大直径格形钢板桩围堰格外迎浪侧和背浪侧土压力的规范法和有限元数值法结果进行对比, 可以得出我国规范法计算的土压力明显小于日本规范法和有限元数值法。

2) 对于大直径格形钢板桩围堰倾覆过程中旋转中心的确定准则, 我国规范法将格形钢板桩底部前趾 (图 4 中 O_c 点) 作为旋转中心, 而日本规范法和有限元数值法计算结果表明结构旋转中心位于围堰

非倾覆侧, 导致我国规范法高估了结构的抗倾覆稳定性。这说明我国规范法确定结构旋转中心的方法不适用于地基为软黏土的情况。

3) 深厚软土地基中大直径格形钢板桩的破坏机理还需进一步研究。

参考文献:

- [1] 毛凯. 格形钢板桩结构设计施工手册 [M]. 北京: 中国计划出版社, 1996.
MAO K. Manual of design and construction for cellular sheet-pile structure [M]. Beijing: China Planning Press, 1996.
- [2] 李德镍. 格形钢板桩结构在港口工程中的应用 [J]. 港工技术, 1997, 34(1): 28-34.
LI D N. Application of cellular sheet-pile structure in port engineering [J]. Port Engineering Technology, 1997, 34(1): 28-34.
- [3] 中华人民共和国交通运输部. 码头结构设计规范: JTS 167—2018 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Design code for wharf structures: JTS 167—2018 [S]. Beijing: China Communications Press, 2018.
- [4] 肖忠, 王元战, 及春宁. 基于极限平衡法的箱筒型基础防波堤稳定性分析 [J]. 岩土工程学报, 2013, 35(5): 828-833.
XIAO Z, WANG Y Z, JI C N. Stability analysis of bucket foundation breakwaters based on limit equilibrium method [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(5): 828-833.
- [5] 蒋敏敏, 蔡正银, 徐光明, 等. 软土地基上箱筒型基础防波堤静力离心模型试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊2): 3865-3870.
JIANG M M, CAI Z Y, XU G M, et al. Experimental study of centrifugal model of bucket foundation breakwater on soft soil foundation under static load [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Supp. 2): 3865-3870.
- [6] 范公俊, 贾延权, 王艳红. 几种围堰施工技术 in 连云港滩涂区的应用 [J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(1): 62-65.
FAN G J, JIA Y Q, WANG Y H. Application of several kinds of cofferdam construction techniques in tidal flat of Lianyungang [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(1): 62-65.
- [7] 王婷婷, 苏莉源, 卢生军. 新型海上风电基础结构空间三维数值模拟研究 [J]. 南方能源建设, 2018, 5(3): 1-7.
WANG T T, SU L Y, LU S J. Spatial 3D numerical simulation research on a new foundation structure of offshore wind power [J]. Southern Energy Construction. 2018, 5(3): 1-7.
- [8] 陈斌. 格形钢板桩结构在广州新沙码头工程中的应用 [J]. 水运工程, 1991(11): 13-21 +60.
CHEN B. Application of cellular sheet-pile structure in Guangzhou Xinsha port engineering [J]. Port & Waterway Engineering, 1991(11): 13-21 +60.
- [9] 张德果, 毛铠. 盐田港格型钢板桩码头结构设计 [J]. 水运工程, 1996(10): 93-95.
ZHANG D G, MAO K. Structure design for the cellular sheet-pile wharf of Yantian port [J]. Port & Waterway Engineering, 1996(10): 93-95.
- [10] U. S. Army Corps of Engineers. Design of sheet pile cellular structures cofferdams and retaining structures; EM 1110-2-2503 [S]. U. S. A.; U. S. Army Engineers Waterways Experiment Station, Information Technology Laboratory, 1989.
- [11] The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan. Technical standards and commentaries for port and harbor facilities in Japan [S]. Japan; The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan, 2009.
- [12] 王元战, 王举睿. 格形钢板桩结构稳定性的有限元数值分析 [J]. 港工技术, 2012, 49(2): 30-34.
WANG Y Z, WANG J R. Finite element numerical analysis on structural stability of celled steel sheet pile [J]. Port Engineering Technology, 2012, 49(2): 30-34.
- [13] 伍晓峰, 刘祚秋. 格形钢板桩抗倾覆稳定性计算新方法 [J]. 水运工程, 2011(12): 45-49.
WU X F, LIU Z Q. New computation for stability against overturning of cellular steel sheet pile [J]. Port & Waterway Engineering, 2011(12): 45-49.
- [14] 郭富林. 格形钢板桩结构计算方法研究 [D]. 天津: 天津大学, 2012.
GUO F L. Research on calculation methods for the cellular-bulkhead structure [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [15] ROSSOW M, DEMSKY E, MOSHER R. Theoretical manual for design of cellular sheet pile structures (cofferdams and retaining structure) [M]. Vicksburg, Mississippi: U. S. Army Engineers Waterways Experiment Station, Information Technology Laboratory, 1987.
- [16] XIAO Z, LI Z Q, LIU Y. Uniaxial capacities of sand-filled large cylindrical structures in soft foundation [C]//ASME. Proceeding of the ASME 2018 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Madrid, Spain, June 17-22, 2018. Madrid: ASME, 2018.
- [17] 中华人民共和国交通运输部. 海港水文规范: JTS 145-2—2013 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2013.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Code for sea port hydrology: JTS 145-2—2013 [S]. Beijing: China Communications Press, 2013.
- [18] 王元战, 焉振. 格形钢板桩结构数值建模方法研究 [J]. 海洋工程, 2014, 32(5): 1-8.
WANG Y Z, YAN Z. Studies on numerical model building methods for cellular sheet pile structures [J]. The Ocean Engineering, 2014, 32(5): 1-8.
- [19] 王刚, 陈杨, 张建民. 大圆筒结构倾覆稳定性分析的有限元法 [J]. 岩土力学, 2006, 27(2): 238-241.
WANG G, CHEN Y, ZHANG J M. Finite element method for analyzing overturn stability of large cylindrical structures [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(2): 238-241.
- [20] MATIN J R, CLOUGH G W. A study of the effects of differen-

tial loadings on cofferdams [R]. Vickburg, Mississippi; U. S. Army Engineers Waterways Experiment Station, Information Technology Laboratory, 1990.

- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑边坡工程技术规范: GB 50330—2013 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for building slope engineering: GB 50330—2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.

- [22] 王元战, 肖忠, 李元音, 等. 筒型基础结构稳定性分析的有限元方法 [J]. 中国港湾建设, 2010(增刊 1): 100-104.
WANG Y Z, XIAO Z, LI Y Y, et al. Finite element method for stability analysis of cylindrical foundation structures [J]. China Harbour Engineering, 2010(Supp. 1): 100-104.

作者简介:



LI J H

李锦辉(通信作者)

1978-, 女, 河北廊坊人, 哈尔滨工业大学(深圳)土木与环境工程学院教授, 博士生导师, 香港科技大学岩土工程博士, 主要从事海洋岩土工程、岩土力学及岩土工程风险分析等研究工作(e-mail) jinhui.li@hit.edu.cn。

宋磊

1990-, 男, 河北唐山人, 哈尔滨工业大学(深圳)岩土工程博士研究生, 主要从事近海结构与软土特性研究工作(e-mail) songlei@stu.hit.edu.cn。

肖忠

1983-, 男, 天津市人, 天津大学建筑工程学院副教授, 博士生导师, 天津大学港口、海岸及近海工程博士, 主要从事港口、海岸及海洋工程新型结构设计理论, 波浪—结构—地基相互作用, 海洋环境下结构物耐久性和大型浮体系泊稳定性等研究工作(e-mail) tjzhongxiao@tju.edu.cn。

马驰

1980-, 男, 安徽利辛人, 中国铁道科学研究院深圳研究设计院勘察设计部主任, 副研究员, 中国铁道科学研究院岩土工程博士, 主要从事软土工程特性、填海及地基处理力学等研究工作(e-mail) machi1963@126.com。

张利民

1965-, 男, 香港科技大学深圳研究院教授, 博士生导师, 四川大学岩土工程博士, 主要从事水利工程、岩土工程风险及可靠度分析、深基础工程、离心机试验及数值模拟方面的研究工作(e-mail) cezhangl@ust.hk。

(责任编辑 郑文棠)



软土地基中大直径格形钢板桩围堰人工岛效果图