

· 地基与基础 ·



格型板桩圆筒内部土体破坏面的稳定性分析

谢锦波

(中交第三航务工程局有限公司, 上海 200032)

摘要: 挡土结构稳定性验算时土体破坏面的选择关系到计算精度与工程经济性, 严重时还会影响工程安全。针对格型板桩圆筒失稳时地基土破坏面可能位于圆筒内部的情况, 分析其破坏模式与计算方法。结合工程实例, 建立数值模型分析失稳时圆筒底部土体破坏面的位置; 针对相邻圆筒底高程不一致的情况提出了 Hansen 法“双破坏面”的计算假定并给出具体算例, 并提出 2 种改善圆筒内部土体破坏面稳定性的思路。结果表明, 增加圆筒入土深度并对被动区与圆筒内部的土体进行加固, 可有效提高格型板桩圆筒沿内部破坏面的稳定性。

关键词: 格型板桩圆筒; 稳定性分析; 破坏面; Hansen 法

中图分类号: U 656.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)06-0190-05

Stability analysis of rupture surface of soil inside sheet pile cellular

XIE Jin-bo

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

Abstract: The selection of soil rupture surface is related to the calculation accuracy and engineering economy in the stability analysis of retaining structure, sometimes it also affects the engineering safety. Considering that the rupture surface of foundation soil may be located inside the sheet pile cellular when it overturns, we analyze its failure mode and calculation method, build a numerical model to analyze the location of soil rupture surface at the bottom of the sheet pile cellular based on an engineering example, propose the calculation assumption of “double rupture surfaces” of Hansen method in view of the inconsistency of the bottom elevation of adjacent cellular, give a specific calculation example, and propose two methods to improve the stability of soil failure surface inside the cellular. The results show that increasing the penetration depth of sheet piles and strengthening the soil in the passive area and inside the cellular can effectively improve the stability of sheet pile cellular along the internal failure surface.

Keywords: sheet pile cellular; stability analysis; failure surface; Hansen method

格型板桩结构是由若干个单块钢板桩通过锁口连接并打入地基中, 拼装成圆形、椭圆形或多边形格体的新型结构^[1], 于 20 世纪 40 年代在法国首先开始应用于码头工程建设, 后在加拿大、西班牙、意大利、美国、日本等国相继应用^[2]。因其在软土地基条件下可直接插入地基土至一定硬度的持力层, 避免开挖土方和设置基床, 具有施工周期短、工程量省以及有利于环境保护等特点^[3]。

近年来, 随着我国水工建筑物、跨海通道建

设的发展, 越来越多的学者针对格型板桩圆筒的失稳破坏模式以及计算方法开展了研究, 如王元战等^[4-5]分析总结格体的平面等效与简化计算方法, 并指出其结构破坏模式为绕格体底面以下某一点发生转动失稳; 焉振^[6]采用强度折减法的有限元分析, 发现格型圆筒结构失稳模式为倾覆破坏, 并得到稳定性安全系数与格体入土深度、外部荷载的关系; 谢锦波^[7]针对主副格仓入土深度不同的情况提出一种等效为二维模型的计算方法。

我国的《格型钢板桩码头设计与施工规程》^[8]对于格型板桩结构的稳定性验算主要参照重力式码头；日本 OCDI 规范^[9]针对格型钢板桩结构抗倾稳定性计算问题开展了系列物理模型试验研究工作，给出计算格型钢板桩结构转动角度、转动点位置的公式，并提出根据结构的倾斜角度来判断结构的抗倾覆稳定性的方法。但是，日本 OCDI 规范也仅对转动中心与墙体的位置关系进行了说明，未规定地基土破坏面的位置；并且其所提出的方法基于板桩入土深度较浅、地基为砂质土的情况，适用范围具有一定的局限性。

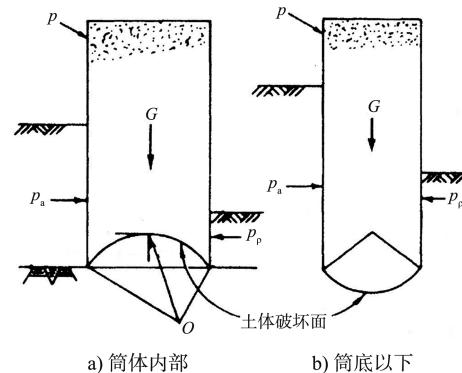
在深厚软基条件下，圆筒底部内侧土体物理力学性质一般较差。格型大圆筒失稳时地基土的破坏面可能位于圆筒内部，与常规重力式挡土结构不同。这一点容易被工程人员所忽略，目前国内尚未见到对此条件下格型钢板桩圆筒稳定性相关文献研究。

本文针对格型板桩圆筒结构失稳时可能发生的地基土剪切破坏面位于筒体内部的情况开展研究，分析其破坏模式与计算方法。依托实际工程，分别采用数值分析与理论计算给出相关算例，并提出 2 种改善稳定性的思路，可为格型板桩圆筒结构的设计计算提供借鉴。

1 破坏模式与计算方法

格型板桩圆筒结构的稳定性分析方法包括重力法、分离法、Hansen 法等。其中 Hansen 法是丹麦学者 Hansen^[10]提出的一种分析格型结构稳定性的“旋转破坏”方法。由于 Hansen 法较适用于剪切破坏面位于筒体内部的稳定性分析，且经大量工程实例验证，已成为包括美国钢铁公司^[11]、阿塞洛米塔尔^[12]在内的多个钢板桩制造企业所推荐的设计方法，因此本文重点介绍并采用该方法开展研究工作。

Hansen 法假定当结构失稳时，破坏面下方的地基土保持静止，而破坏面上方的所有筒内的地基土与回填料和圆筒结构一起，作为一个刚体围绕旋转中心移动，见图 1。



注： P 为结构所受外部荷载； G 为破坏面以上格体范围的土体重力； p_a 、 p_p 分别为主动、被动土压力。

图 1 Hansen 法的格型结构失稳破坏模式

该破坏模式下的旋转中心可能位于圆筒底部以下，也可位于筒底以上，相应的土体破坏面为凸面（筒体内部）或凹面（筒底以下）。实际破坏面的位置与格型板桩圆筒的受力情况、地质条件等因素有关。当圆筒内部土体为软土，而底部位于物理力学性质良好的持力层时，往往会发生破坏面位于圆筒内部，也就是如图 1a）所示的情况。

Hansen 将破坏面假定为经过后排板桩趾部的对数螺旋曲面，如图 2 所示。以转动中心为原点建立极坐标系，底部对数螺旋曲面方程如下：

$$r = r_0 e^{\theta \tan \varphi} \quad (1)$$

式中： r_0 为转动中心到螺旋线起点的半径； φ 为地基土内摩擦角； r 、 θ 为极坐标系中的变量。

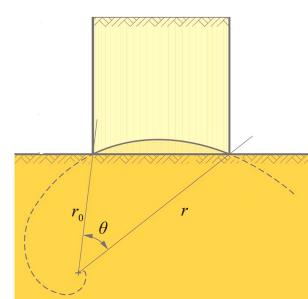


图 2 对数螺旋破坏面

根据该方法，格型板桩圆筒的稳定性安全系数可按下式计算：

$$F_s = M_R / M_0 \quad (2)$$

式中： F_s 为结构稳定性安全系数； M_R 为绕转动中心的抵抗力矩； M_0 为绕转动中心的倾覆力矩。

破坏面的形状由格型结构的底部宽度和地基土力学性质决定。计算时通过假设不同的 r_0 ，得

到一系列对数螺旋破坏面，并获得最小的 F_s 。

2 工程算例

2.1 工程概况

某填海工程护岸采用直腹式的格型钢板桩圆筒结构，主格直径 31.194 m，副格直径 15.96 m。格型钢板桩施工完成并内部回填后作为挡土结构，海侧抛石形成斜坡堤，陆侧回填后进行堆载预压处理形成陆域。护岸结构如图 3 所示。

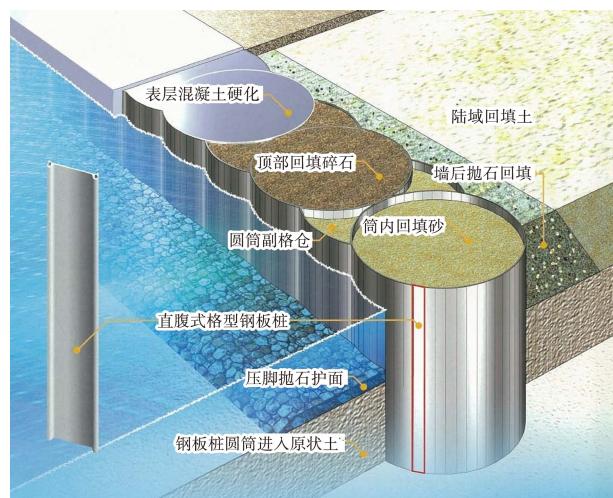


图 3 格型钢板桩圆筒护岸

工程所在海域平均水深约 10 m，海床面以下分布厚度 20 m 以上的海相沉积淤泥质土，其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，底部进入下卧持力层冲积土一定深度。

为了分析可能出现的破坏模式，在对格型钢板桩圆筒护岸进行稳定性分析时，先采用有限元数值分析研究其破坏面位置，再用相应的理论或规范方法进行稳定性计算。

2.2 二维数值分析

采用我国的《格型钢板桩码头设计与施工规程》和日本 OCDI 规范中的等效方法将格型结构简化为二维平面模型。二维模型中格型圆筒宽度 26.7 m，底部进入冲积砂土层。数值分析采用岩土有限元软件 PLAXIS 2D 进行，计算模型如图 4 所示。

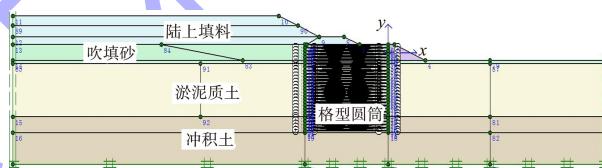


图 4 有限元模型

不同土体材料所采用的计算参数见表 1。

表 1 主要土层计算参数

土体	密度 $\rho/(t \cdot m^{-3})$	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
吹填砂	1.9	0	30	-	20
淤泥质土	1.5	-	-	5 ($z \leq 3 m$) 1.7 + 1.1z ($z > 3 m$)	2 ($z \leq 3 m$) 0.7 + 0.44z ($z > 3 m$)
冲积砂土	1.9	1	31	-	25

注： z 为深度 (m)。

采用强度折减法进行整体稳定性验算的破坏模型如图 5 所示。可以看出，圆筒底部位置的土体破坏面明显位于圆筒内部、筒底高程以上，此时整体稳定安全系数为 2.0。

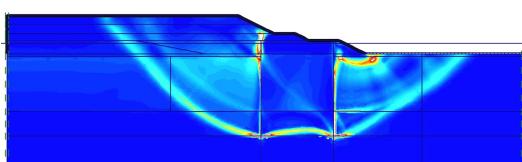


图 5 强度折减法失稳破坏模式

为了对比失稳破坏时不同土体破坏面的差异，对相同工况条件采用 GEO SLOPE 软件进行极限平衡法的圆弧滑动稳定性计算，破坏模型如图 6 所示。可以看出，圆筒底部的土体破坏面位于筒底高程以下，整体稳定安全系数为 2.2，大于强度折减法的计算结果。

由此可知，当格型板桩圆筒作为重力式结构进行稳定性计算时，除去计算方法不同带来的差异，可能由于未能考虑土体破坏面在圆筒内部的

失稳模式导致计算结果偏于不安全。

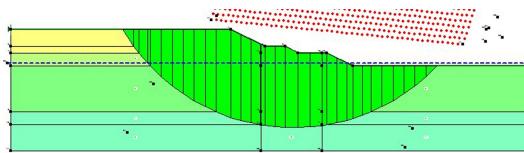


图 6 传统极限平衡法失稳破坏形式

2.3 Hansen 法

根据强度折减法的计算结果，在稳定性分析

中采用式(1)(2)的 Hansen 法对内部破坏面进行验算，通过假定不同的 r_0 确定不同的破坏面位置。倾覆力矩主要考虑圆筒陆侧的剩余水压力与主动土压力，抵抗力矩主要由海侧被动土压力、破坏面上方土体的重力以及滑移面上土体剪切力提供。

具体计算过程不再详细展开，计算结果如图 7 所示。当 r_0 为 6 m 时的破坏面为最不利工况，此时安全系数 F_s 为 1.01，不满足设计要求的 1.2。

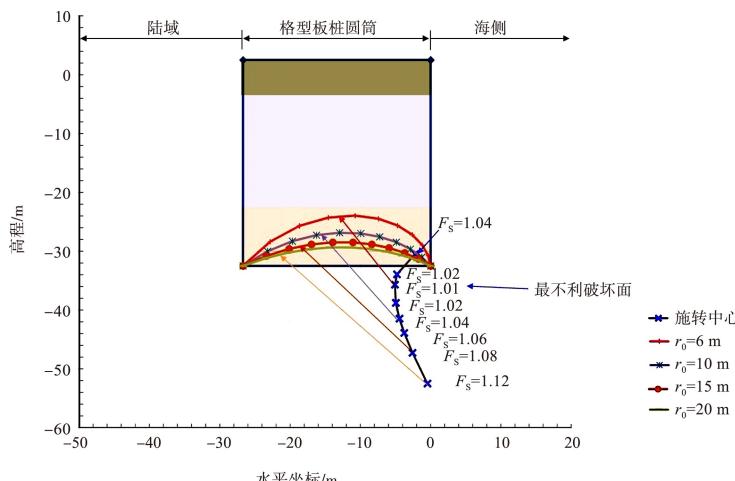


图 7 Hansen 法计算结果

3 改进方案

3.1 改进思路

根据上文分析可知，当采用 Hansen 法对内部破坏面进行的稳定性验算无法满足要求时，可考虑从以下 2 个方面提高：

1) 对海侧被动区与圆筒内部土体进行地基加固，提高地基土抗剪强度从而增加被动土压力与破坏面上的土体剪切力以提高抵抗力矩。

2) 增加圆筒入土深度，使最不利破坏面维持

在强度较高的冲积土层中，同时有利于提高破坏面上土体重量 G 和被动土压力 p_p 。

本次工程实例中综合采用了以上 2 种改进思路。在圆筒内部及海侧采用碎石桩进行地基加固，同时增加圆筒入土深度。考虑到格型板桩圆筒沉施工的可行性，主格仓底部进入冲积层一定深度以保证破坏面维持在冲积土层中，副格仓进入冲积层，如图 8 所示。

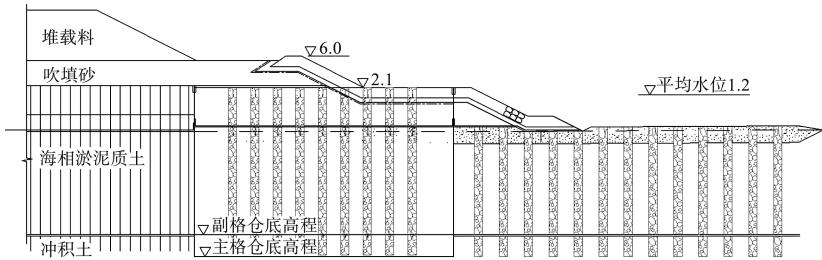


图 8 改进的格型钢板桩圆筒护岸方案 (单位: m)

3.2 相邻筒底高程不一致时内滑弧稳定性计算

Hansen 所提出的将圆筒内部的土体破坏面假定为对数螺旋曲线的稳定性分析方法，需要满足

所计算的各个圆筒格仓底高程相同的条件。而实际工程中受地质条件变化与施工顺序的影响，经常出现相邻格仓的钢板桩底高程不一致的情况，

如文献[7]。此时假设破坏面有 2 个，分别对应不同底高程的格仓失稳破坏，2 个破坏面旋转中心一致，如图 9 所示。

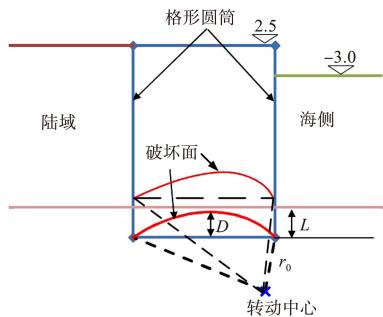


图 9 双破坏面计算 (单位: m)

为了保证主格仓内的土体破坏面在冲积土层中，令主格仓进入冲积土层的入土深度满足以下关系：

$$L = D + 1 \quad (3)$$

式中： L 为格形板桩在冲积土层的入土深度 (m)； D 为破坏面曲线到圆筒底高程的最大垂直距离 (m)。

根据不同高程的格仓结构尺寸计算相应外部荷载。通过 r_0 与 D 的迭代计算，可得稳定性安全系数与 r_0 、 D 之间的关系分别如图 10 所示。此时对应的 D 为 0.46 m， r_0 为 3.1 m，最小安全系数为 1.34，满足设计要求。

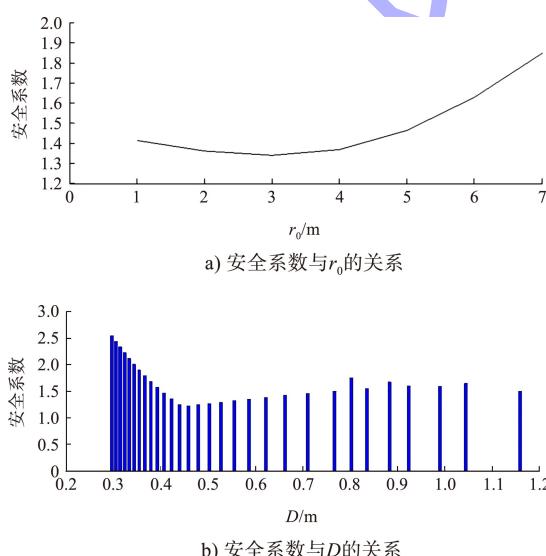


图 10 安全系数与 r_0 、 D 的关系

4 结语

1) 在深厚软基条件下，格型板桩圆筒结构失稳时的地基土破坏面可能位于圆筒内部，此时稳定性计算可假定破坏面为经过前后排板桩趾部的

对数螺旋曲面。

2) 强度折减法与极限平衡法的稳定分析结果对比表明，土体破坏面在圆筒内部的稳定性安全系数小于传统圆弧滑动方法，在实际工程应用中须予以充分重视。

3) 在进行格型板桩圆筒沿内部土体破坏面的稳定性分析时，可以通过调整旋转中心位置并迭代计算确定最不利破坏面与对应的安全系数。

4) 增加圆筒入土深度与土体地基加固可有效改善格型圆筒内部破坏面的稳定性；当圆筒底高程不一致时，可采用一个旋转中心对应“双破坏面”的稳定性计算方法。

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.
- [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] Nippon Steel Corporation. Manuel of design and construction for cellular-bulkhead structure [R]. Tokyo: Nippon Steel Corporation, 2002.
- [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] 焉振. 格型钢板桩结构承载机理及数值计算方法研究 [D]. 天津: 天津大学, 2016.
- [7] 谢锦波. 主副格不等长的直腹式格型钢板桩海墙数值分析 [J]. 水运工程, 2021(2): 131-136.
- [8] 中港第二航务工程局. 格型钢板桩码头设计与施工规程: JTJ 293—1998[S]. 北京: 人民交通出版社, , 1998.
- [9] The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan. Technical standards and commentaries for port and harbor facilities in Japan [S]. Tokyo: The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan, 2009.
- [10] HANSEN J B. Earth pressure calculation [M]. Copenhagen: The Danish Technical Press, 1953.
- [11] United States Steel. Steel sheet piling design manual [R]. Pittsburgh: United States Steel, 1984.
- [12] Arcelor Mittal. Design and execution manual of AS 500 straight web steel sheet piles. [R]. Luxembourg: Arcelor Mittal, 2009.

(本文编辑 王璁)