

大型海工结构物建造场地滑道强度安全储备分析*

田会元¹,史宏达^{1*},高人杰²,孟 珣¹,徐明强¹

(1. 中国海洋大学 工程学院,山东 青岛 266100;

2. 青岛行远海洋工程设计研究有限公司,山东 青岛 266100)

摘 要:为了适应当前的海洋开发需求,海洋工程结构物的大型化已成为必然发展趋势,这使得原有海工建造施工场地的滑道处于临界承载状态,给安全生产带来了巨大隐患。本文针对典型滑道结构,采用有限元参数化建模技术(ANSYS Parametric Design Language, ANSYS-APDL)模拟上部载荷滑块在滑道板上的灵活布置,对滑道强度储备进行分析。研究表明:设计载荷下,滑道板的强度储备较滑道桩体及滑道桩侧土小,滑道强度的控制因素为滑道板强度;改变上部载荷滑块的位置,探索不同位置处滑道极限承载力,提高施工建造过程中滑道利用率。

关键词:滑道;极限承载力;强度储备;ANSYS-APDL

中图分类号: U673.32 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1002-3682.2016.01.006

在海洋结构物组件的建造及由陆至水的移运过程中,滑道是支撑整个组件重量的基础,滑道结构是否稳定将直接影响到整个施工过程的安全性^[1-3]。

随着科技进步和行业发展,海洋工程结构物组件的体积和重量也在不断增加,组件的大小及建造、运输方式对滑道的承载能力提出了更高的要求^[4]。研究以某大型海工结构物典型滑道为例,对滑道强度安全储备进行分析。

1 工程概况

随着海洋工程结构重量的递增,要求的滑道承载力有时会超过计划使用的标定承载力,则该条滑道不能满足项目建造要求^[5-6]。若滑道块在滑道板上的布置位置并不在最不利位置,相反处于承载力相对较大的位置,该处的承载力有可能比标定承载力大。为了挖掘滑道承载力的潜力,使其满足日益增长的海洋结构物支反力要求,在不降低安全储备并符合国家规范的前提下,本文对滑道承载力的强度储备进行深入探讨。

实际工程中,海洋结构物组件重量分布多不均匀,不能简单地考虑在均匀分布的基础

* 收稿日期:2015-10-10

作者简介:田会元(1991-),女,硕士研究生,主要从事海洋可再生能源开发利用和港口海岸及近海工程方面研究. E-mail:tianhuiyuanzjj@163.com

* 通讯作者:史宏达(1967-),男,教授,博士,主要从事海洋可再生能源开发利用和港口、海岸及近海工程方面研究. E-mail:hd-shi@ouc.edu.cn

上乘以一定的系数,需通过钢结构支腿滑靴、钢板和垫块将上部组件的重量以均布荷载的形式传递至滑道面板。

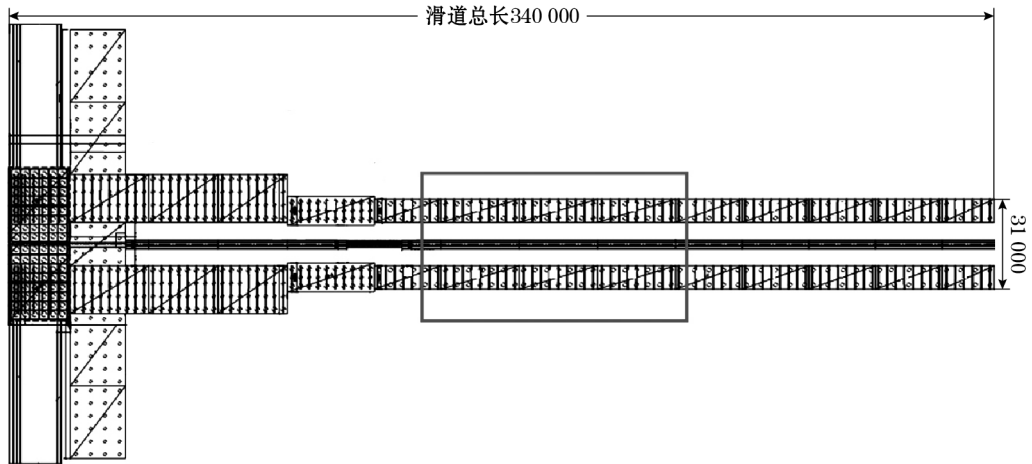


图 1 滑道平面布置图(mm)

Fig. 1 Layout map of the slipway(mm)

图 1 为研究计算的滑道平面布置图,左侧为临海侧,右侧为陆侧。此滑道共有 11 种面板,平面尺寸、厚度、配筋率及板下对应桩的桩径和数目不同,研究以框内滑道板为例进行详细计算分析,该滑道板位于滑道的中间位置,是滑道上 11 种滑道板中数量最多的典型滑道板,该滑道板对应的上部载荷分布及断面如图 2,图 3 所示。

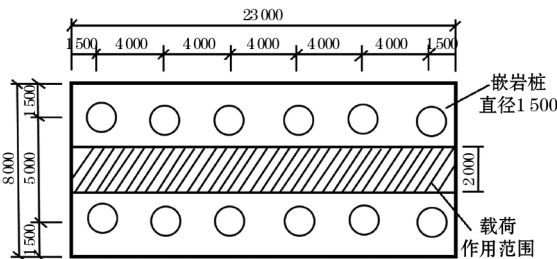


图 2 上部载荷分布图(mm)

Fig. 2 Distribution of the upper load(mm)

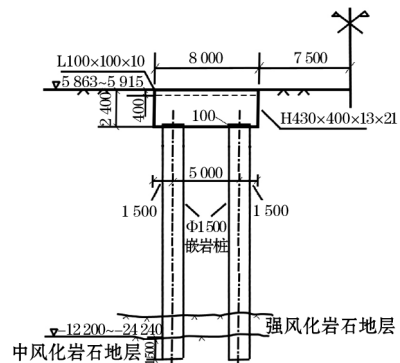


图 3 滑道断面图(mm)

Fig. 3 Section of the slipway(mm)

2 有限元模型

利用 APDL 与宏技术组织管理 ANSYS 有限元命令,实现参数化建模、参数化荷载施加等。用 Solid 65 单元模拟滑道的钢筋混凝土结构,Solid 65 单元是专门用于混凝土、岩石等抗压能力远大于抗拉能力的非均匀材料单元,可以模拟混凝土中的加强钢筋和混凝土材料的拉裂和压碎破坏。根据设计图纸计算不同跨中及桩上板带的配筋率,进而建

立桩上板带和跨中板带。参考滑靴位置分布,在滑靴与滑块接触面上施加向下的均布荷载,嵌岩桩的作用模拟为刚性垫片,且将刚域底部全约束,滑道板有限元模型如图4所示。滑道设施所承受的垂直力全部由滑道板下方的嵌岩桩或沉箱基础承担,滑道板各段之间均埋置有传力销管以消除各段之间的差异沉降。组块滑移下水过程中在滑道上拖拽产生的巨大水平力均采用按桩距摆放的简支滑块临时形成的压柱,转化成压柱内力来消除,因此嵌岩桩不承受水平作用力,故可将刚域所承受的总垂向压力作为荷载输入施加到桩顶。

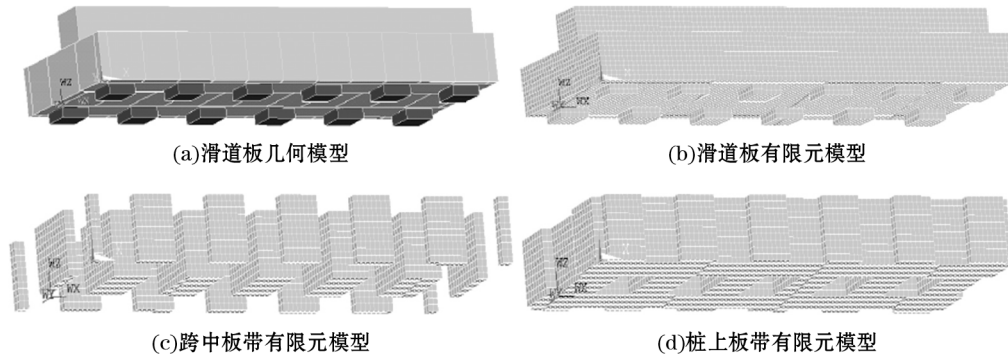


图4 滑道板有限元模型示意图

Fig. 4 Finite element model of the slipway slab

桩体结构与土体的相互作用是一种高度非线性行为,其接触状态随荷载、材料、边界条件等发生变化,同时也存在摩擦非线性问题。研究取桩体面积作为目标刚性接触面,单元类型为 TARGE170;各层土表面作为柔性接触面,单元类型为 CONTA173。采用面面接触的方式来模拟桩体与土体的接触效果。

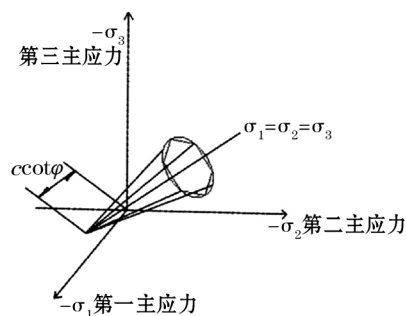


图5 Drucker-Prager 屈服面

Fig. 5 Drucker-Prager yield surface

岩石和土壤材料受压屈服强度远大于受拉屈服强度,且材料受剪时,颗粒会膨胀,常用的 VonMises 屈服准则不适用于这类材料。更能准确描述这类材料的强度标准为 Drucker-Prager 准则,使用该准则的材料简称为 DP 材料^[7]。

DP 材料的特征参数为黏聚力 c , 内摩擦角 φ , 膨胀角 ψ , 其屈服准则的表达式^[7]为

$$F = 3\beta\sigma_m = \left[\frac{1}{2} \{S\}^T [M] \{S\} \right]^{1/2} - \sigma_y = 0, \quad (1)$$

式中, β 为材料常数, 与内摩擦角 φ 有关; σ_m 为平均应力; $\{S\}$ 为偏应力; $[M]$ 为 Mises 屈服准则中的偏应力修正系数; σ_y 为屈服应力, 与黏聚力 c 和内摩擦角 φ 有关。对于 DP 材料, 当材料参数 β, σ_y 给定后, 屈服面为图 5 所示的圆锥面。

3 滑道强度控制因素分析

早期海洋石油平台组块滑移装船过程中, 分析的侧重点往往是平台组块结构本身的安全性, 很少考虑滑道结构的安全性, 随着海洋工程结构物大型化发展趋势, 滑道结构在平台组块的建造和滑移装船阶段中的安全, 也应该给予足够的关注。滑道板、滑道桩体以及滑道桩侧土体的承载力共同决定着滑道的最终强度。滑道板的受力云图如图 6 所示。在设计载荷作用下, 按照《水运工程混凝土结构设计规范》^[8] 计算滑道截面受弯弯距 $M = 1.81 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。滑道板底部由 49 个节点进行支撑, 通过估算每个节点所能承受的最大压力, 确定传递给桩的载荷大小为 $N_1 = 4.52 \times 10^6 \text{ kN}$ 。

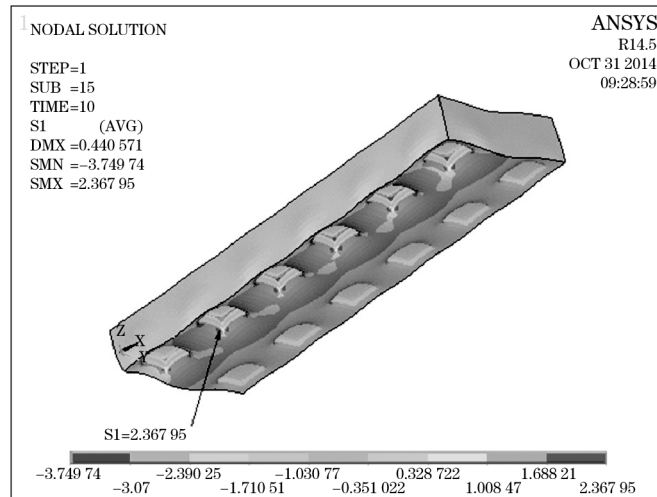


图 6 设计载荷作用下滑道板应力云图

Fig. 6 Stress nephogram of the slipway slab under the designed load

根据地质勘察资料, 整个底部土层分为 3 部分: 顶层为淤泥土层, 中层为粉质黏性土层, 底层为花岗斑岩层。对桩及桩周土体进行建模, 在 N_1 作用下, 桩的受力云图如图 7 所示, 其最大压力 $N_2 = 1.75 \times 10^6 \text{ N}$ 。由桩体资料计算桩的极限承载力为 $N_2' = 1.05 \times 10^7 \text{ N}$ 。

计算单桩轴向承载力的方法众多, 研究采用在海洋工程中应用最为广泛的 API-RP2A 方法^[9], 单桩的轴向承载力 Q 可表示为

$$Q = Q_f + Q_p = \sum_{i=1}^n f_n + A_m + qA_p, \quad (2)$$

式中, f_n 为桩侧极限单位摩阻力 (kN/m^2); A_m 为桩周侧面积 (m^2); q 为桩端部处单位承载力 (kN/m^2); A_p 桩端部截面积 (m^2)。

结合地质参数计算桩周 3 层土的侧摩阻力之和, 即桩承载力为 $2.07 \times 10^7 \text{ N}$ 。由表 1 可知, 设计载荷作用下, 滑道桩体和滑道桩侧土的强度储备远大于滑道板, 故滑道板是滑

道强度的主控因素。后期滑道设计改造过程中应着重考虑加强滑道板的强度以提高滑道的整体强度储备。

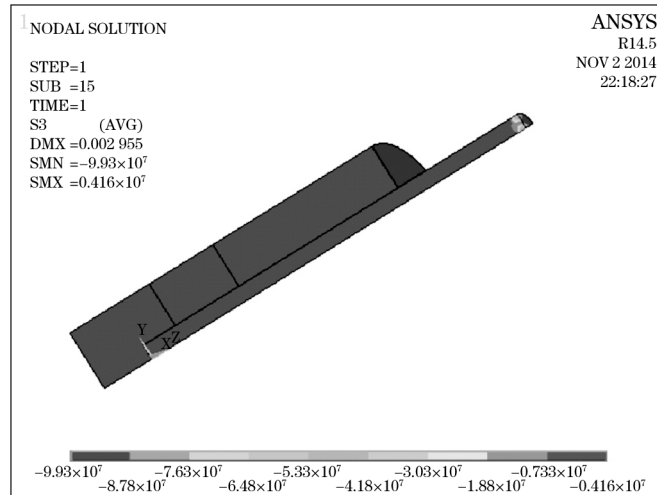


图 7 设计载荷作用下滑道桩应力云图

Fig. 7 Stress nephogram of the slide pile under the designed load

表 1 滑道各部分强度储备汇总表

Table 1 Strength reserve table of all parts of the slipway

| 项 目 | 滑道桩体 | 滑道桩测土 | 滑道板 |
|------|----------------------|----------------------|--------------------------|
| 载荷效应 | 1.75×10^6 N | 4.52×10^6 N | 1.81×10^6 N · m |
| 极限承载 | 10.5×10^6 N | 20.7×10^6 N | 3.28×10^6 N · m |
| 强度储备 | 83% | 78% | 45% |

4 滑道板强度储备分析

滑道板强度储备分析中,常见的工况为多组件施工建造或滑移装船同时进行,因此对多组件同时施工时滑道承载力的最不利荷载的分析更具实际指导意义。滑道服役工况下,建造物尺度变化使得着力滑块位于滑道板的不同位置,给滑道结构施加荷载,其基本受力状态与多跨梁类似如图 8a,5 跨及以上的多跨连续梁活荷载最不利布置原理如下:

图 8a 中支座 B 截面最大负弯矩荷载布置:支座两个邻跨有活荷载,每隔一跨布置活荷载见图 8b;图 8a 中跨中点 2 截面最大正弯矩荷载布置:本跨有活荷载,每隔一跨布置活荷载,见图 8c。

依据活荷载不利布置理论,需要根据滑道块所处的不同位置,分析滑道板的承载效应。采用经典力学分析方法,对不同滑靴间距的工况进行滑道承载力分析,以 250 mm 为步长将荷载滑块从滑道边缘移动,每移一步,逐渐增加荷载值,记录滑道板达到极限承载力时的荷载值,并以极限荷载与滑道板设计荷载的比值作为参考值,探索滑块放置在滑道板不同位置时的强度储备。图 10 中,横坐标对应滑块中心至滑道板边缘的距离,荷载块

移动范围如图 9 所示,结合结构对称性,仅计算载荷块位于 1 000~4 000 mm 时滑道板的极限承载力。

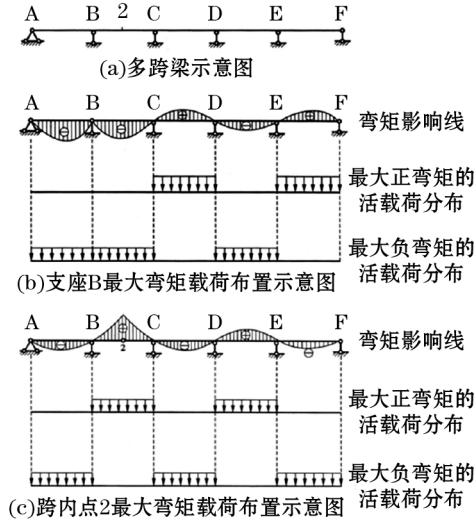


图 8 活载荷的最不利布置

Fig. 8 The most unfavorable arrangement of the live loads

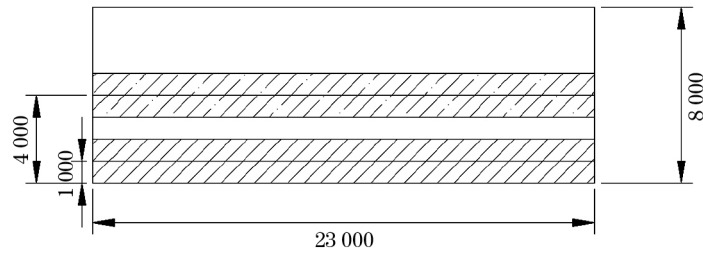


图 9 载荷块移动范围示意图(mm)

Fig. 9 Moving range of the load block(mm)

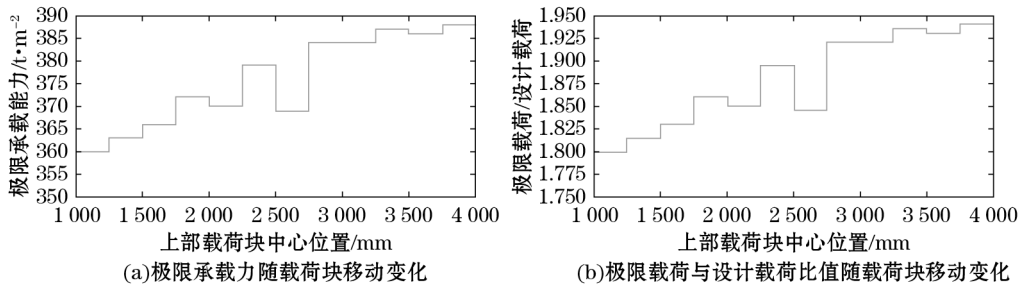


图 10 载荷块位置变化对应滑道板极限承载力

Fig. 10 Change of the load block position corresponding to the ultimate bearing capacity of the slipway slab

滑块放置在滑道板边缘时滑道板强度储备最小,随着滑块向滑道板中间移动,滑道板强度储备整体呈现递增趋势,在 2 000,2 500 和 3 500 mm 位置强度储备有略下降趋势,与桩的位置和滑道板配筋率的变化有关。此极限承载力变化曲线可用于指导海工结构物建造过程中的放置位置,避开强度储备较低的区域。

5 结 论

本研究采用有限元参数化建模技术,对大型海洋结构物建造及运输滑道强度安全储备进行分析,得到如下几点结论:

1)对于典型海工滑道,根据结构特点及服役工况,可采用下述方式进行有效的数值模拟:桩的竖向承载力远大于滑道板,可将板底桩的作用模拟为刚性垫片,提取垫片节点的最大支反力,保守估算,刚域总压力=节点最大支反力 \times 刚域节点数,此总压力为板传递给桩的荷载值,再对桩进行受力分析。同时利用有限元参数化建模,以一定步长移动上部载荷块,模拟工程中结构物放置的随机性。

2)考虑活载荷不利布置对承载力的影响,随着滑块由滑道板边缘向中间移动,滑道的极限承载力呈递增趋势,递增幅度约为 15%。现役海工结构物施工建造过程中需避开边缘位置;拟建结构可在设计期内调整尺度及重量,提高滑道的利用率。

3)影响滑道强度的因素包括滑道板、滑道桩体以及桩侧土的极限承载能力。本文研究表明,该种场地土及滑道板特点下,桩体、桩侧土及滑道板的强度储备由高至低,即整个滑道强度的主控因素为滑道板。

参考文献:

- [1] 李淑民. 超大型结构物建造过程中滑道受力的建模分析[J]. 港工技术, 2012, 49(3): 22-24.
- [2] 李越松. 大型海洋石油平台组块滑移装船过程中滑道结构安全性评价[J]. 水道港口, 2006, 27: 45-48.
- [3] 王阔, 窦星慧, 刘广辉, 等. Spar 平台建造的滑道承载力分析[J]. 中国造船, 2011, 52: 91-97.
- [4] THOMAS B, HADFIELD M, AUSTEN S. Wear observations applied to lifeboat slipway launches [J]. Wear, 2009, 267(11): 2062-2069.
- [5] SUNIL R. Effect of sliding contact geometry on the induced stresses in discontinuous scoatings [D]. Thiladelphia: The Pennsylvania State University, 1998: 25-26.
- [6] 王安龙, 梁丰收, 李成升, 等. 蓬莱巨涛 5 万吨级滑道建设及码头改造中关键问题的处理[J]. 水运工程, 2012, 467: 102-109.
- [7] 石长. 基于 ANSYS 的岩土参数优化反分析和边坡稳定性分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006: 30-33.
- [8] 中华人民共和国运输部. 水运工程混凝土结构设计规范: JTS 151-2011[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [9] 李润培, 王志农. 海洋平台强度分析[M]. 上海: 上海交通大学, 1992: 48-50.

Analysis of Slipway Strength Safety Reserve of Large Marine Engineering Building Venue

TIAN Hui-yuan¹, SHI Hong-da¹, GAO Ren-jie², MENG Xun¹, XU Ming-qiang¹

(1. College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2. Qingdao Xingyuan Marine Engineering Design & Research Co. Ltd., Qingdao 266100, China)

Abstract: With the needs of rapid ocean development, large scale of marine engineering structures has been an inevitable development tendency. This makes the slipways of the original construction site a critical load state and brings a huge hidden danger to the safety production. According to the structure of typical slipway, the slipway strength reserve is analyzed by simulating the flexible arrangement of the upper load slide block on the slipway slab using the finite element parametric modeling technique (ANSYS-APDL). The results show that within the designed load, the strength reserve of the slipway slab is smaller than those of the slide pile and the soil surrounding the pile, indicating that the strength of the slipway slab is the factor controlling the slipway strength. To improve the utilization rate of the slipway during the construction, the ultimate bearing capacities of the slipway at different positions are studied by changing the position of the upper load slide block.

Key words: slipway; ultimate bearing capacity; strength reserve; ANSYS-APDL