

Research on Strength Analysis of Bottom Platform Considering Loss of Bottom Area

Liang Sun Zhanbin Meng*

Beibu Gulf University, Qinzhou, Guangxi, 535011, China

Abstract

In addition to bearing fixed loads, variable loads, as well as environmental loads such as wind, waves, and currents during the operation of a seated platform, it is also necessary to consider the loss of the cushion seating area due to scouring and erosion, which may cause deformation and damage to the platform structure. Therefore, the strength analysis of the platform structure is particularly important for the safety of the platform. This paper takes a certain shallow sea bottom platform as the research object, and uses ABAQUS software to establish an elastic-plastic analysis model of the bottom platform based on the coupling effect of sinking pad and foundation. Considering the loss of the bottom area at different positions of the sinking pad, the overall structural strength of the platform is analyzed and its variation law is explored.

Keywords

loss of seating area; submersible; structural strength; ABAQUS

考虑坐地面积丧失下坐底式平台强度分析研究

孙亮 蒙占彬*

北部湾大学, 中国·广西 钦州

摘要

坐底式平台工作过程中除了要承受固定载荷、可变载荷以及风、浪、流等环境载荷之外, 更应考虑因淘空与冲刷使沉垫坐地面积丧失, 致使平台结构发生变形和破坏, 因此平台结构强度分析对平台安全就显得尤为重要。论文以浅海的某坐底式平台为研究对象, 利用ABAQUS软件建立基于沉垫-地基耦合作用的坐底式平台弹塑性分析模型, 考虑坐地面积丧失在沉垫不同位置的情况, 对平台整体结构强度进行分析并探究其变化规律。

关键词

坐地面积丧失; 坐底式平台; 结构强度; ABAQUS

1 引言

坐底式平台结构由沉垫、上平台及两者间连接支柱组成, 是最早应用的一种移动式海洋平台, 具有结构简单、易于制造、工作可靠、操作便利等特点, 一般适于 10m 以内作业水深的浅海区域勘探作业^[1]。在浅水区, 由于海底表层沉积物特性、海底基质液化、海浪冲蚀、海流的运移等多种原因综合作用^[2], 导致平台在海上作业过程中发生冲刷、淘空、滑移和倾覆等事故的风险增加。

坐底式平台工作过程中除了要承受固定载荷、可变载荷以及风、浪、流等环境载荷之外, 更应考虑因淘空与冲刷使沉垫坐地面积丧失, 致使平台结构发生变形和破坏, 因此

必须首先保证平台作业的安全性^[3], 而平台结构强度分析对平台设计就显得尤为重要。论文以浅海的某坐底式平台为研究对象, 利用 ABAQUS 软件建立基于沉垫—地基耦合作用的坐底式平台弹塑性分析模型, 考虑坐地面积丧失在沉垫不同位置的情况, 对平台整体结构强度进行分析并探究其变化规律。

2 基于沉垫—地基耦合作用的坐底式平台有限元建模

2.1 土体弹塑性理论模型选取

在位工况条件下, 坐底式平台一直遭受风、浪、流等外部环境载荷的作用, 而由于沉垫—地基作用, 沉垫附近土体时常发生旋转、垂直、水平和扭转的变形, 因此选取适当的土体本构模型对真实反映沉垫—地基耦合作用效果具有重要意义。在土体本构模型的发展过程中, 逐渐出现了弹性模型、非线性弹性模型和弹塑性模型三类, 根据塑性增量理论建立的弹塑性理论模型, 如 Mohr-Coulomb 模型、

【作者简介】孙亮 (2000—), 男, 中国山东烟台人, 硕士, 从事海洋工程装备与技术研究。

【通讯作者】蒙占彬 (1979—), 男, 中国天津蓟县人, 博士, 教授级高级工程师, 从事船舶与海洋结构物设计技术研究。

Drucker-Prager 模型, 其中 Mohr-Coulomb 模型应用最为广泛, 对于粗粒土和细粒土都有良好的模拟性能, 是弹塑性模型的一种, 为论文研究所采用。

2.2 坐底式平台参数

本平台为坐底式钢质非自航石油钻井平台, 平台为矩形。平台由沉垫、上平台和中间支撑结构三部分组成。沉垫为四周具有 45° 斜坡的箱形结构, 内设压载水舱、淡水舱和燃油舱等。上平台为双层甲板矩形箱体结构。中间支撑结构有 6 根大立柱, 6 根支撑钻台负荷的中立柱, 28 根小立柱。平台主尺度见表 1, 自存及作业工况平台主要重量见表 2。

表 1 平台主尺度参数表

序号	参数	数值 (m)
1	总长	74.4m
2	型宽	36.4m
3	型深	5.2m
4	沉垫长	70.8m
5	沉垫宽	41.0m
6	沉垫深	3.0m
7	大立柱	φ 4.0m × 20.9m
8	中立柱	φ 1.0m × 15.7m
9	小立柱	φ 0.6m × 12.7m
10	主甲板距基线	15.7m

表 2 自存及作业工况平台主要重量

项目	正常作业工况	风暴自存工况
上甲板 (t)	819.3	819.3
空船重量 (t)	5684	5684
可变载荷 (t)	6659.3	6424.8
沉垫 (t)	908	908
立柱 (t)	1114.7	1114.7
平台整体重量 (t)	12343.3	12108.8

2.3 平台模型建立

利用 ABAQUS 软件进行平台有限元建模, 沉垫和上平台采用板单元 (S4R) 进行模拟, 土体采用实体单元 (C3D8R) 进行模拟, 上平台和沉垫连接处的立柱采用铁木辛柯梁单元 (B31) 进行模拟。对于上平台附属结构, 比如直升机平台、起重机、悬臂梁、吊机等没有直接进行建模, 而是通过在软件中以施加质量点的方式将附属结构的质量施加在上平台。平台有限元模型如图 1 所示。

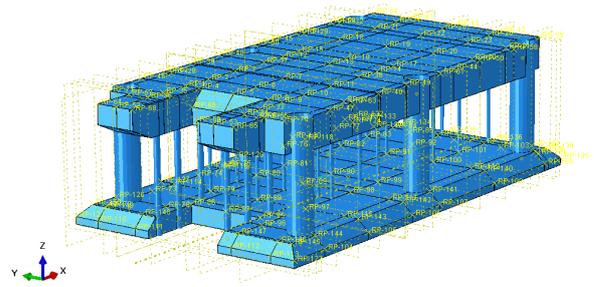


图 1 坐底式平台有限元模型

2.4 土体模型建立

为减小土体边界对沉垫 - 地基相互作用的影响, 坐底式平台地基土体的形状设为长方体, 土体长、宽、高尺寸分别设为 150m、150m、17m, 并且根据目标海域的地质资料对土体赋予属性, 土体具体参数表由表 3 给出, 土体模型见图 2。

表 3 自存及作业工况平台主要重量

土壤层号	土壤名称	土壤深度 (m)	有效重度 (kN/m ³)	摩擦角 (°)
1	粉土 1	0.0~2.2	6.5	10
2	粉土 2	2.2~6.3	8.5	15
3	淤泥质粉质粘土	6.3~13.8	7.5	10

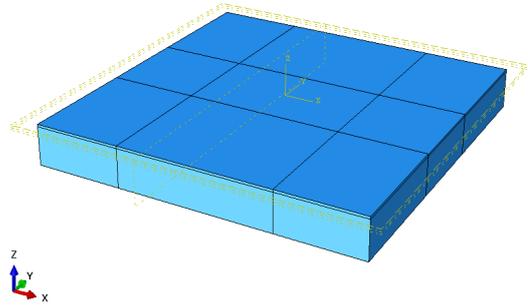


图 2 土体模型

2.5 土体与平台相互作用模型

为了更加真实地模拟沉垫 - 地基相互作用, 论文充分考虑沉垫 - 地基接触面上的非线性特性, 在软件相互作用过程中, 将土体表面设为主表面, 沉垫与土体接触面的沉垫表面为从表面, 并设定沉垫 - 地基接触面上法向方向为硬接触, 切向为滑摩擦类型。质量点施加在上平台采用点与点耦合的作用方式。在初始分析步中设置土体模型沿 x 方向上两个面的位移, 设置沿 y 方向上两个面的位移, 设置土体底部沿 z 方向的位移。在网格划分时对土体在沉垫表面处的网格进行加密处理, 以此提高计算收敛性。土体与平台相互作用模型如图 3 所示。

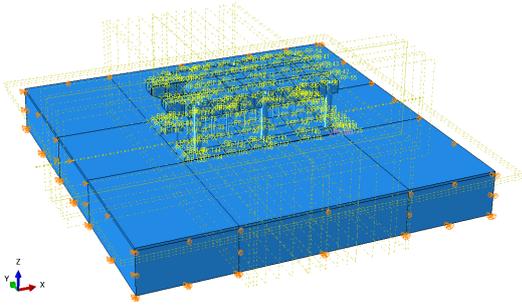


图 3 土体与平台相互作用模型

2.6 地应力平衡

地应力是存在于地壳中未受工程扰动的天然应力，也是引起土体变形与破坏的根本应力。

论文地应力平衡方法为分布平衡法，平衡时考虑平台和土体自重。鉴于论文在强度分析时需要计算的模型较多，为减少计算成本，论文结合 ODB 导入法，将最终地应力平衡结果作为初始应力场赋予后续计算模型中，以 10^{-4} m 为最低标准来判断地应力平衡过程是否合理^[4]。初始地应力平衡结果如图 4 所示。

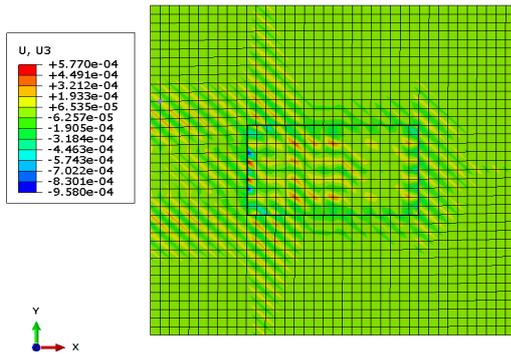


图 4 初始地应力平衡结果

3 平台环境载荷计算

3.1 平台设计工况及载荷

平台依据中国船级社《海上移动平台入级规范》(2023)^[5]，论文对坐底式平台在风暴自存工况和正常作业工况的状态下进行计算分析。以平台实际工作环境角度出发，经查询资料，平台正常作业工况与风暴自存工况环境参数见表 4。

表 4 正常作业工况与风暴自存工况环境参数

工况	正常作业工况	风暴自存工况
水深 (m)	10	10
水面流速 (m/s)	1.03	1.14
波高 (m)	3	5
周期 (s)	7	7
风速 (m/s)	25.8	45

该平台适用于在辽东湾、渤海湾和莱州湾等，泥沙质以及淤泥质海底，于无冰区进行石油钻井工作。坐底式平台属于移动式海上平台，根据规范要求移动式平台不考虑地震载荷作用，所以只考虑风、波浪和海流作用在平台^[6]。

3.2 环境载荷计算

根据中国船级社相关规范要求对平台进行风载荷计算，风速为五十年一遇风速，并按如下公式进行风压计算：

$$P = 0.613 \times 10^{-3} V^2 \quad (1)$$

式中， V 为平台设计风速，m/s。

平台水面以上部分所受风力 F 可按下式计算：

$$F = C_h C_s S P \quad (2)$$

式中， P 为风压，kPa； S 为受风构件正投影面积， m^2 ； C_h 和 C_s 为受风构件的高度系数和形状系数，依据规范选取。

海洋工程结构波浪载荷计算方法的选择通常取决于结构是小尺度 ($D/L < 0.2$) 还是大尺度 ($D/L > 0.2$)。波浪的惯性力和绕射力是大尺度结构所受波浪力中重要组成部分，而波浪的惯性力和拖曳力则是小型结构受波浪力的主要组成部分。平台的立柱均为小尺度构件，选用 Morison 方程来计算波浪力。平台的沉垫为大尺度构件，选用绕射理论计算波浪力，即用 F-K 方法。

由于海流流速变化缓慢，为方便计算将海流视为稳定流动，对坐底式平台作用仅考虑拖曳力。由此，坐底式平台所受海流载荷可根据式 (3) 进行计算：

$$F_c = \frac{1}{2} \rho C_D A u_s^2 \quad (3)$$

式中， C_D 为拖曳力系数； ρ 为海水密度， t/m^3 ； A 为构件在与流速垂直平面上的投影面积， m^2 ； u_s 为海流流速，m/s。

论文的风流载荷计算，以斯托克斯五阶波为理论，在 ABAQUS 软件中，施加 *AQUA 和 *WAVE 这两个关键词及相应环境参数，通过相位角搜索来查找不同方向工况下平台结构所受最大波浪力的入射角。在正常作业工况和风暴自存工况下分别以 0° 、 60° 、 90° 、 120° 、 180° 波流方向进行最大相位角搜索，其结果分别见表 5 和表 6。坐底式平台所受总环境载荷结果见表 7。

4 平台结构强度分析

4.1 平台结构材料参数

作为安全裕量考虑，安全系数取值为 1.25，平台主要结构材料参数如表 8 所示。

4.2 坐底面积丧失位置

各国规范对坐底面积丧失率的规定基本相同。对于带整体沉垫的平台，坐底面积丧失率为 20%。论文在各个工况和坐底面积丧失率控制在 20% 情况下，考虑沉垫的艏部、艉部、左舷和右舷等位置出现坐底面积丧失，探究沉垫、支柱和上平台等各个构件结构强度变化情况。沉垫平面结构如图 5 所示。

表 5 正常作业工况下不同波流方向相位角搜索结果

波流角度	0°	60°	90°	120°	180°
最大波浪力入射角度	84°	125°	115°	110°	120°
最大基底剪力 (kN)	1262.31	1122.33	1062.64	1113.68	1049.79

表 6 风暴自存工况下不同波流方向相位角搜索结果

波流角度	0°	60°	90°	120°	180°
最大波浪力入射角度	75°	100°	95°	99°	93°
最大基底剪力 (kN)	2513.46	2199.22	1831.16	2090.97	1949.71

表 7 正常作业工况与风暴自存工况下总环境载荷结果

编号	工况	风载荷 (kN)	波流载荷 (kN)	总环境载荷 (kN)
1	作业工况 0°	204.94	1484.38	1689.32
2	作业工况 60°	315.92	1338.69	1654.61
3	作业工况 90°	255.39	1265.03	1520.42
4	作业工况 120°	303.63	1324.66	1628.29
5	作业工况 180°	204.73	1254.11	1458.84
6	自存工况 0°	623.37	2936.92	3560.29
7	自存工况 60°	961.06	2597.70	3558.76
8	自存工况 90°	776.94	2212.51	2989.45
9	自存工况 120°	923.54	2482.81	3406.35
10	自存工况 180°	622.82	2334.39	2957.21

表 8 平台主要结构材料参数表

结构	材料种类	屈服强度 (MPa)	许用应力 (MPa)
沉垫	AH32	315	252
上平台	B 级普通钢	235	188
大立柱	AH32	315	252
中立柱	AH32	315	252
小立柱	B 级普通钢	235	188

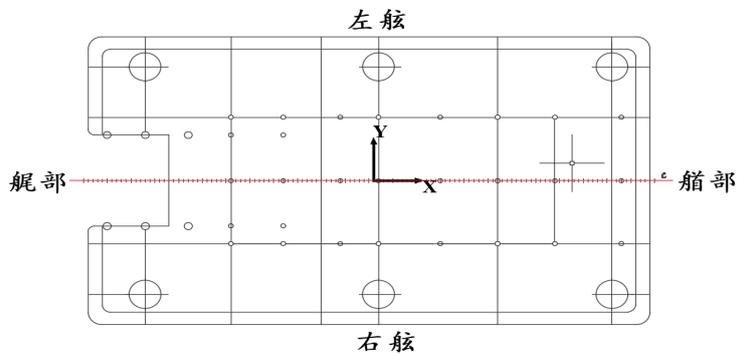


图 5 沉垫平面结构图

4.3 计算结果

以沉垫左舷处坐底面积丧失 20% 情况下正常作业工况

0° 入射角为例, 平台静力分析应力与位移如图 6 所示, 其余工况计算结果如表 9~ 表 12 所示。

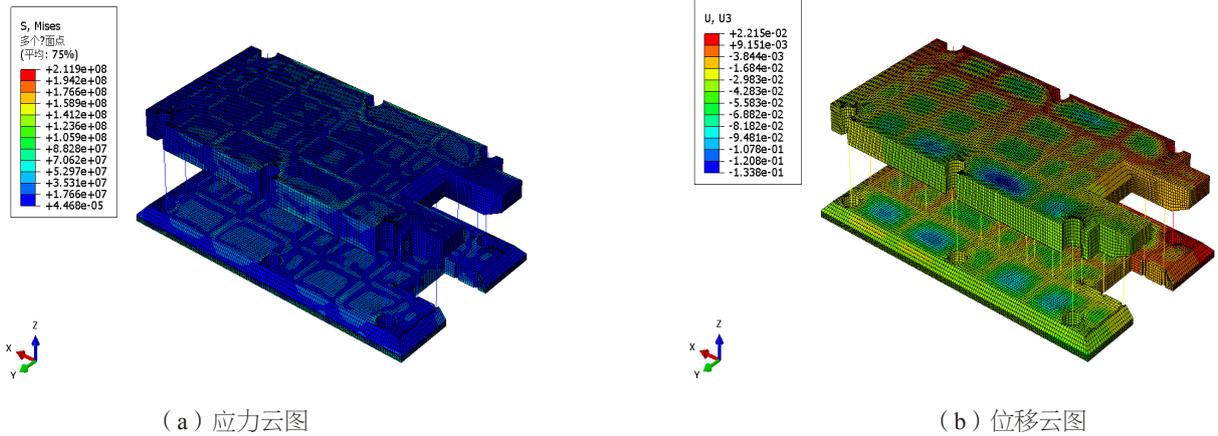


图 6 正常作业工况 0° 环境载荷作用下平台应力及位移分析结果

表 9 沉垫左舷坐底面积丧失 20% 情况下整体结构最大应力及位移

工况	最大应力 (MPa)	最大位移 (cm)
作业工况 0°	211.9	13.38
作业工况 60°	208.6	13.31
作业工况 90°	204.6	13.16
作业工况 120°	207.9	13.20
作业工况 180°	196.0	12.58
自存工况 0°	195.5	12.69
自存工况 60°	191.1	12.50
自存工况 90°	184.2	12.32
自存工况 120°	190.6	12.39
自存工况 180°	183.5	12.23

表 10 沉垫右舷坐底面积丧失 20% 情况下整体结构最大应力及位移

工况	最大应力 (MPa)	最大位移 (cm)
作业工况 0°	155.0	14.68
作业工况 60°	152.9	13.69
作业工况 90°	149.5	13.28
作业工况 120°	151.5	13.52
作业工况 180°	148.9	13.08
自存工况 0°	147.8	13.13
自存工况 60°	147.5	12.94
自存工况 90°	143.4	12.40
自存工况 120°	146.4	12.80
自存工况 180°	140.3	12.25

表 11 沉垫艏部坐底面积丧失 20% 情况下整体结构最大应力及位移

工况	最大应力 (MPa)	最大位移 (cm)
作业工况 0°	141.4	12.86
作业工况 60°	139.5	12.29
作业工况 90°	135.3	11.86
作业工况 120°	139.3	12.09
作业工况 180°	133.4	11.80
自存工况 0°	129.3	11.81
自存工况 60°	128.6	11.77
自存工况 90°	126.6	11.67
自存工况 120°	127.8	11.76
自存工况 180°	122.4	11.51

表 12 沉垫艏部坐底面积丧失 20% 情况下整体结构最大应力及位移

工况	最大应力 (MPa)	最大位移 (cm)
作业工况 0°	205.1	16.41
作业工况 60°	203.9	15.38
作业工况 90°	199.5	15.10
作业工况 120°	202.2	15.12
作业工况 180°	197.6	14.17
自存工况 0°	169.5	14.69
自存工况 60°	168.7	14.61
自存工况 90°	164.3	14.16
自存工况 120°	165.4	14.18
自存工况 180°	158.5	14.10

由表 9~ 表 12 结果对比分析可知,沉垫的艏部、艉部、左舷和右舷等位置出现坐底面积丧失时,作业工况外载荷入射角为 0° 时的平台应力与位移均为该位置下最大值。最危险的工况为当沉垫左舷出现坐底面积丧失时外载荷 0° 作业工况,最大应力为 211.9MPa,出现在中立柱 #6 与沉垫 #2 压载水舱(左)连接处。将表 9 至表 12 结果与表 8 进行比较,正常作业工况与风暴自存工况下平台沉垫、上平台及支柱结构的计算最大应力均小于其许用应力,强度满足要求。

5 结论

①论文通过建立基于沉垫-地基耦合作用的坐底式平台弹塑性分析模型,对考虑沉垫坐底面积丧失在不同位置情况下平台整体结构强度进行了系统的研究,结果表明,在沉垫坐底面积丧失在不同位置和各种工况下,平台沉垫、上平台及支柱结构强度均满足要求。

②从不同位置和工况下看应力分布,应力较大部分集中在中立柱 #6 与沉垫 #2 压载水舱(左)连接处。这是因为该处位于沉垫左舷、右舷和艉部坐底面积丧失边缘处,要传递上平台、立柱及沉垫上的巨大自身重量以及竖向载荷,又要承受和抵抗波流产生的水平载荷,因此对该部分结构应特别注意。

③在沉垫丧失相同位置情况下,作业工况不同环境入射角所受的应力均大于自存工况,这是由于平台自存工况重

量要明显大于自存工况的重量,并且平台所受的环境载荷数量级为 10^4kN 远远小于平台作业工况下的重量,所以当沉垫出现坐底面积丧失时,平台的自身重量以及可变载荷重量占主要影响,会使丧失处产生较大的应力。

④揭示地基特性对坐底式平台坐底性能及结构强度影响规律,提高坐底式平台的稳定性和安全性,为我国坐底式平台设计和施工提供理论与技术支持

参考文献

- [1] 安长武.浅海坐底式平台强度分析研究[J].装备制造技术,2018(4):70-73.
- [2] 安有杰.坐底式平台淘空、滑移机理分析[J].科技与企业,2014(9):346.
- [3] 吴成利.坐底式海洋平台整体结构强度有限元分析[A].第十三届中国科协年会第13分会场-海洋工程装备发展论坛.第十三届中国科协年会第13分会场-海洋工程装备发展论坛论文集[C].中国科学技术协会学会学术部,2011:5.
- [4] 饶运章,饶睿.三维初始应力场在FLAC3D中的反演与重构实现[J].矿业研究与开发,2014,34(1):11-15.
- [5] 中国船级社.海上移动平台入级规范[M].北京:人民交通出版社,2020.
- [6] 郭洪升.辽河作业一号平台着底稳性的研究设计[J].中国海洋平台,2005(1):12-17.