

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.01.026

# 波浪荷载对 SPM 重力锚承载力影响的研究

郝潇涵, 唐小微

(大连理工大学 海岸与近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116023)

**摘要:** 为确保重力锚在工程中的安全使用, 基于弹塑性增量有限元方法, 分析了波浪荷载作用下重力锚周围 seabed 动力响应规律以及重力锚水平承载力的变化规律。通过分析发现: 波浪荷载作用下, 锚底土体超孔隙水压力呈波动式上升, 累积超孔压比最高可达 0.9 左右, 从而使土体有效应力减小导致重力锚的水平承载力下降; 且锚前沿土体塑性应变随循环周次的增加而逐渐累积是重力锚的水平承载力下降的另一主要原因。并得出随着土体弹性模量、黏聚力和内摩擦角的增大, 土体累积超孔压逐渐减小; 弹性模量越大, 重力锚前沿土体的累积塑性应变数值也越大; 然而随着黏聚力和内摩擦角的增大, 重力锚前沿土体的累积塑性应变数值在减小。

**关键词:** 波浪荷载; 重力锚; 有限元方法; 水平承载力; 动力响应

中图分类号: TU441

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2019)01-0148-06

## Influence of Wave Loading on the Bearing Capacity of SPM Gravity Anchor

HAO Xiaohan, TANG Xiaowei

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116023, China)

**Abstract:** In order to ensure the safe use of the gravity anchor in engineering, the dynamic response law of the seabed that around the gravity anchor and the horizontal bearing capacity of gravity anchor are analyzed based on the elastoplastic incremental finite element method. The results show that under the wave loading, the excess pore water pressure of the seabed that under the anchor fluctuates and accumulates with the cycle number. The cumulative excess pore pressure ratio can reach up to 0.9 and the effective stress of the soil decreases which cause the reduction of the horizontal bearing capacity of the gravity anchor. Moreover, the plastic strain of the soil gradually accumulates with the cycle number which is the another main reason for the decrease of the horizontal bearing capacity. In addition, as the elastic modulus, cohesion and internal friction angle of the soil increase, the cumulative excess pore pressure decreases gradually. The larger the elastic modulus, the larger the cumulative plastic strain of the seabed at the front of the gravity anchor. However, as the cohesion and internal friction angles increase, the cumulative plastic strain decreases gradually.

**Keywords:** wave loading; gravity anchor; finite element method; horizontal bearing capacity; dynamic response

海洋环境的复杂性使得波浪荷载作用下海洋结构物基础安全不能得到有效保障, 由此导致诸多工程事故。重力锚作为海洋单点系泊系统的主要锚固形式<sup>[1-2]</sup>, 其承载力也成为岩土工程的主要研究之一。然而, 目前国内外关于重力锚的研究都是建立在静力分析基础上, 忽视了波浪荷载对其性能的影响。

国内外关于重力锚的研究有很多, 竺新文<sup>[3]</sup>通过室内模型试验, 对重力锚在不同受力角度的稳定性进行了模拟。李怀亮等<sup>[4]</sup>通过研究不同底面积下重力锚, 得出底面积是影响重力锚水平承载力的重要因素。徐保照<sup>[5]</sup>通过有限元模拟, 分析了位于钙质土上重力锚的破坏机理, 并且对串锚进行了研究。李飒等<sup>[6]</sup>通过改进了重力锚的设计计算方法, 使重

收稿日期: 2018-09-18

修稿日期: 2018-10-16

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51639002); 国家重点研发计划项目(2016YFE0200100)

作者简介: 郝潇涵(1992—), 女, 河北邯郸人, 硕士研究生, 研究方向为岩土动力特征。E-mail: haoxiaohan@mail.dlut.edu.cn

通讯作者: 唐小微(1968—), 男, 河北唐山人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土地震工程等方面的教学和科研工作。

E-mail: tangxw@dlut.edu.cn

力锚的抗滑力提高了 17%。叶邦全<sup>[7]</sup>指出,底质的剪切强度和锚与底质之间的摩擦力会影响重力锚承受水平负荷的能力。然而,以上研究都没有考虑波浪荷载对重力锚的影响。在海面平静的情况下,可认为重力锚只承受锚链对其施加的恒定的水平拉力作用,但在经历巨大风暴潮时,波浪力的作用导致锚链对重力锚施加循环荷载,从而对重力锚的承载力产生影响。因此研究波浪荷载对重力锚承载力的影响十分必要。

针对海上单点系泊系统(Single Point Mooring System),谢铜辉等<sup>[8]</sup>对悬链式系泊系统的特点进行了系统的分析。在研究多锚链系泊浮筒纵荡的基础上还将其与升沉及纵摇耦合,使其与工程情况更接近。张俊生等<sup>[9]</sup>建立了三维时域计算模型来分析浅水中浮体的运动特征。郑妍颖等<sup>[10]</sup>通过考虑波浪荷载、风和流的共同作用,采用时域模拟的方法对含裙板的锚泊浮筒进行研究,得出锚链的受力情况。

波浪荷载作用下饱和海床的动力响应分析已有不少的研究成果。海床土体中的动力响应特性可以进行实验研究<sup>[11-12]</sup>外也可以通过有限元模型进行分析<sup>[13-14]</sup>,从而得出波浪荷载作用下的超孔压数值。结构-土体作用的动力响应问题可通过数值模拟的方法进行研究<sup>[15]</sup>。胡翔等<sup>[16]</sup>提出用结构-土体耦合模型和海床饱和土体的流固耦合来研究波浪荷载作用下海床土体内的孔压和应力变化规律更为准确。郭俊杰等<sup>[17]</sup>研究三维波浪作用下土体动态响应,指出土体参数对海床的孔隙水压力和有效应力有显著影响。高军<sup>[18]</sup>通过研究不同固结程度的黏土,指出循环荷载作用后土体出现塑性应变累积,且孔隙水压力与累积塑性应变有一定的相关性。

本文根据锚泊浮筒时域运动方程等方法模拟了单点系泊系统受到的波浪荷载,并得出波浪荷载下的锚链力。根据锚链力在重力锚上施加水平循环荷载,采用三维有限元方法分析了波浪作用下重力锚承载力的变化及锚下海床土体动力响应规律。

## 1 工程原型

达里斯萨拉姆港口采用单点系泊锚固系统来完成对海上输油系统的锚固。在选取锚固形式时因重力锚结构简单、能适应各种土质且有经济效益而被选用。

浮筒锚泊系统和重力锚形式,如图 1 所示。

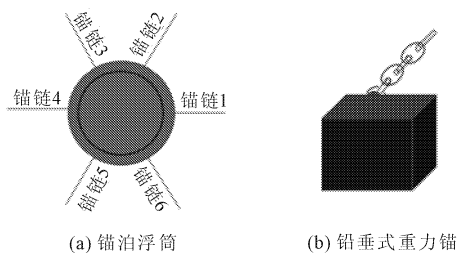


图 1 SPM 重力锚

单点系泊系统由浮筒、锚链和重力锚构成。如图 2 所示,水深 21 m,浮筒由 6 根锚链固定,锚链的另一端连接重力锚。当浮筒-锚链系统受波浪荷载作用时,锚链和浮筒组成的系统会受到动力响应,进而锚链施加给重力锚水平循环荷载。重力锚为钢质锚,靠其自身重量固定在海底上。重力锚尺寸为 4.24 m × 4.24 m × 0.531 m。锚链可以有效地将系统受到的巨大的波浪荷载转换成循环荷载作用在重力锚上。

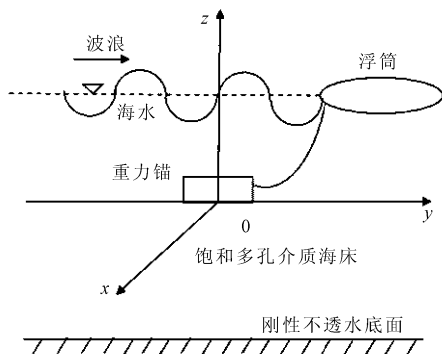


图 2 重力锚、海床、波浪相互作用的模型简图

## 2 循环荷载分析

锚泊浮筒外径为 12 m,内径为 3.55 m,裙板直径为 14 m,型深为 5 m。锚链为非线性的悬链线,锚链长度为 273 m,锚链直径为 98 mm。波浪波高为 10 m,周期为 10 s。

当浮筒-锚链系统受波浪荷载作用时,锚链和浮筒组成的系统会受到动力响应,锚泊浮筒时域运动方程可用下式<sup>[10]</sup>表示:

$$\sum_{j=1}^6 [M_{kj} + m_{kj}(\infty)] \ddot{X}_j(t) + b_{v,kj} \dot{X}_j(t) + C_{kj} X_j(t) + \int_{-\infty}^t K_{kj}(t-\tau) \dot{X}_j(\tau) d\tau = F_{wk}(t) + F_{ck}(t) + F_{ek}(t) + F_{mk}(t), k = 1, 2, \dots, 6 \quad (1)$$

式中:  $M_{kj}$  为浮筒的质量矩阵;  $m_{kj}(\infty)$  为频率无穷时的附加质量矩阵;  $C_{kj}$  为静水力刚度矩阵;  $b_{v,kj}$  为线性

黏性阻尼系数矩阵;  $K_{kj}(t - \tau)$  为浮筒的延迟函数矩阵;  $F_{ek}(t)$ 、 $F_{mk}(t)$ 、 $F_{wk}(t)$ 、 $F_{ck}(t)$  分别为作用在浮筒上的波浪扰动力、锚泊力、风力和流流。

作用在浮筒上的波浪载荷可用下式<sup>[10]</sup> 计算:

$$F_{ek}(t) = F_{ek}^{(1)}(t) + F_{ek}^{(2)}(t) \quad (2)$$

其中,

$$F_{ek}^{(1)}(t) = \operatorname{Re} \left\{ \sum_{j=1}^N a_j F_{kj} e^{i(-\omega_j t + \epsilon_j)} \right\} \quad (3)$$

$$F_{ek}^{(2)}(t) = \sum_{i=j}^N \sum_{j=1}^N a_i a_j P_{kij} \cos[(\omega_i - \omega_j)t + (\epsilon_i - \epsilon_j)] \quad (4)$$

式中:  $F_{ek}^{(1)}(t)$  为作用在浮筒上的一阶波浪载荷;  $F_{ek}^{(2)}(t)$  为作用在浮筒上的二阶波浪载荷;  $F_k$  为一阶波浪扰动力传递函数。对于任意两个频率组成的双色波, 用  $a_i$ 、 $a_j$  表示双色组成波的波幅值,  $\omega_i$ 、 $\omega_j$  为频率,  $\epsilon_i$ 、 $\epsilon_j$  为随机相位角;  $P_{kij}$  为双色波频率  $\omega_i$ 、 $\omega_j$  对应的二阶差频波浪载荷传递函数的实部。

通过时域计算可得锚链力的大小, 进而可根据锚链力, 对重力锚施加水平循环荷载。

## 3 动力响应分析模型

### 3.1 有限元理论

本文采用 ABAQUS 软件进行有限元模拟, 使用弹塑性增量有限元方法对波浪荷载作用下重力锚与土体互作用体系进行分析计算。弹塑性增量有限元方法与极限平衡方法和极限分析方法相比有其独特的优点。首先, 该方法可以将结构与土体之间的变形协调关系很好的模拟出来。其次, 它能较好的满足极限平衡状态时的平衡和破坏条件。再次, 它不仅可以讨论影响土体应力 - 应变的主要因素还能充分考虑土体 - 结构相互作用时的复杂关系。并且, 当模型中材料不均质、形状不规则, 且接触和边界条件较多时对该方法的使用没有影响。由此可见, 弹塑性增量有限元方法在理论上是全面成熟的。

弹塑性增量有限元分析包括静力分析方法和动力分析方法两种形式, 本文采用动力有限元分析方法。

### 3.2 动力响应计算方法

采用有限元方法对波浪荷载作用下重力锚的水平承载力进行分析。计算采用 ABAQUS 软件, 重力锚的材质为钢材, 其密度为  $7\ 850\ \text{kg}/\text{m}^3$ , 利用弹性本构对其进行模拟, 弹性模量取  $3 \times 10^4\ \text{MPa}$ , 泊松比 0.3。为消除边界效应, 选取土体尺寸为  $30.0\ \text{m} \times 30.0\ \text{m} \times 5.5\ \text{m}$ , 单元类型采用 C3D8PR 单元, 为了提

高模拟精度, 土体单元采用渐进加密的单元划分, 如图 3 所示。土体采用 M - C 模型, 根据工程勘察所提供的土体类型及相关数据, 模拟了四种不同工况下的土, 土体参数见表 1。从表 1 中可以看出四种工况黏性土的弹性模量、内摩擦角和黏聚力均逐渐增大。虽然渗透系数和孔隙比没有相应的变化规律, 但已知渗透系数和孔隙比对累积超孔压和累积塑性应变几乎没有影响<sup>[19]</sup>。

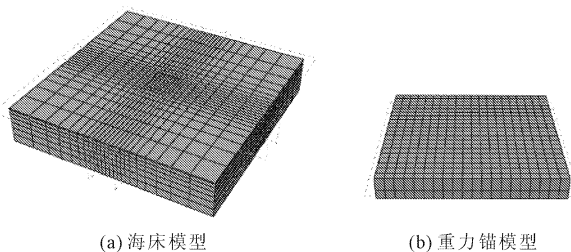


图 3 有限元模型

重力锚与土体之间设置接触面, 接触面采用 Surface - to - surface 类型, 在接触属性定义切向和法向接触面特性, 并对土体底部和侧面进行约束。

表 1 黏性土基本物理力学性质

工况	天然密度 / $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 / $\text{MPa}$	内摩擦角 / $(^\circ)$	黏聚力 / $\text{kPa}$	渗透系数 / $(\text{m}^2 \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	孔隙比
1	1400	5.37	14.8	12	$5.0 \times 10^{-9}$	1.50
2	1790	7.80	19.7	20	$1.5 \times 10^{-9}$	0.94
3	1940	12.39	20.3	26	$4.0 \times 10^{-10}$	0.80
4	1830	16.59	21.4	33	$6.0 \times 10^{-7}$	0.60

### 3.3 重力锚水平承载力有限元模拟方法

重力锚水平承载力的模拟可由以下几步完成:

(1) 建立重力锚 - 海床土的有限元模型。

(2) 考虑土体和重力锚的自重, 以及重力锚所受的循环荷载作用, 完成对模型荷载的施加。

(3) 在原有荷载的基础上, 将线性增大的水平荷载施加在重力锚上, 直至不收敛。对模型进行后处理, 得到荷载 - 位移曲线。

(4) 从三种结构失稳判别准则中选择合适的准则进行判别。

(5) 根据判别准则, 从 P - S 曲线中确定重力锚的水平承载力。

## 4 计算结果分析

### 4.1 水平承载力的变化

当重力锚位于黏性土上时, 其水平承载力可由式(5)计算:

$$F_h = s_{uz}A + 2s_{ua}D_fB \quad (5)$$

式中:  $F_h$  为水平方向承载力;  $s_{uz}$  为深度为  $D_f$  处土体的不排水抗剪强度;  $s_{ua}$  为锚底到深度为  $D_f$  处土体的平均不排水抗剪强度;  $A$  为锚底面面积;  $D_f$  为锚埋入深度;  $B$  为锚底面宽度。

由式(5)可知,重力锚的锚底面积、锚底面宽度和锚埋入深度会影响重力锚的水平承载力,本次计算过程中保持重力锚的底面积、埋入深度和底面宽度不变,且保持重力锚的重量恒定,通过是否施加水平循环荷载来计算重力锚的水平承载力。

图 4 和图 5 分别为位于四种工况下黏性土上的重力锚在无循环荷载和有循环荷载作用时的荷载 - 位移图。

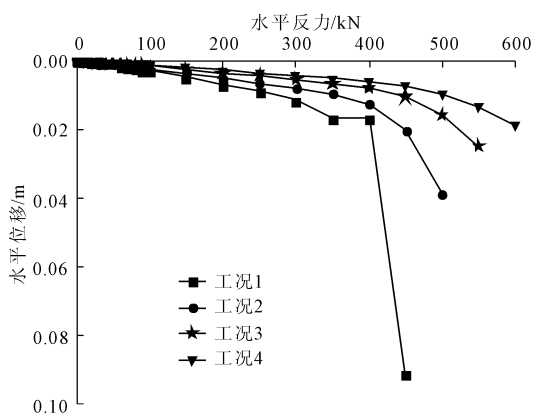


图 4 无循环荷载作用时土的荷载 - 位移图

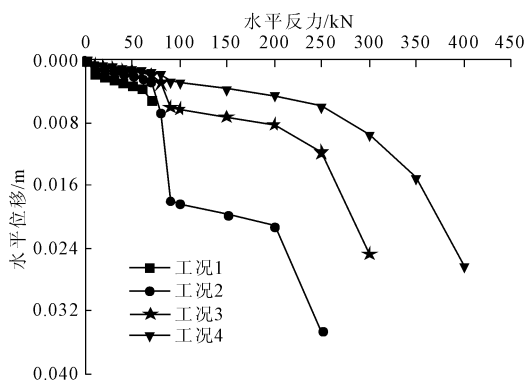


图 5 循环荷载作用时土的荷载 - 位移图

根据极限承载力判别准则,通过比较图 4、图 5 可以得出重力锚在有无循环荷载作用下位于四种工况海床土上的水平承载力,如图 6 所示。从图 6 中可以看出,重力锚在受到循环荷载作用后其水平承载力明显下降,并且循环荷载作用下重力锚在四种工况的海床土上的承载力下降值逐渐减小。

### 4.2 海床中超孔隙水压力的变化

承前所述,循环荷载作用下重力锚的水平承载力会下降,通过研究循环荷载下重力锚周围海床动

力响应发现,锚底土体出现超孔压累积的现象。

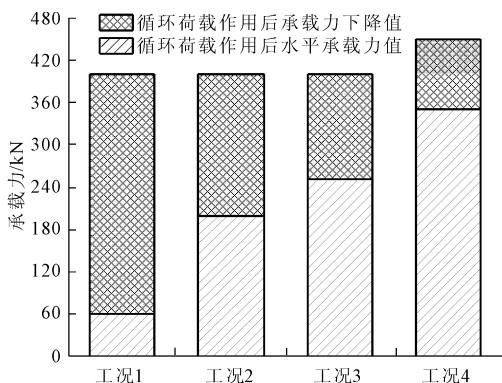


图 6 循环荷载作用前后承载力变化图

通过对比以下四个工况下的超孔压比变化,可以得出重力锚下四种不同工况下黏性土的超孔压值变化情况,如表 2 所示,从表中可以看出重力锚锚底四种工况土中超孔压累积值逐渐减小。

表 2 各工况下超孔压比汇总

工况	1	2	3	4
累积超孔压比	0.90	0.75	0.70	0.30

### 4.3 海床中塑性应变的变化

循环荷载作用下,重力锚前沿海床土体产生了塑性应变,并且塑性应变随着循环周次的增加而累积。表 3 为重力锚在受到循环荷载作用时,四种工况土体中等效塑性应变分布及塑性应变数值。土体中等效塑性应变的分布揭示了土体的塑性变形情况。

表 3 各工况塑性应变汇总

工况	等效塑性应变云图	应变起始值 /m	应变终止值 /m	应变累积值 /m
1		0.0130	0.010	0.0020
2		0.0035	0.0042	0.0007
3		0.0012	0.0015	0.0003
4		$2.3 \times 10^{-16}$	$2.3 \times 10^{-16}$	0.0000

从等效塑性应变云图中可知,在循环荷载作用下,重力锚前沿海床土体产生明显塑性应变。通过比较表中四种工况下重力锚前沿土体塑性应变累积

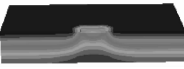
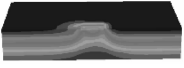
值可以看出锚前沿土体中塑性应变累积值从工况 1 到工况 4 逐渐减小。

#### 4.4 承载力下降机理分析

研究表明,循环荷载作用下重力锚周围海床土体会产生累积超孔隙水压力,且锚前沿土体会产生累积塑性应变。黏性土从工况 1 到工况 4,重力锚锚底土体超孔隙水压力累积值逐渐减小,重力锚前沿土体的塑性应变累积值也逐渐减小,与此同时,重力锚在循环荷载作用后承载力下降值也逐渐减小。由此可见,累积超孔压和累积塑性应变会影响重力锚水平承载力,即随着重力锚锚底土体累积超孔压的增多和重力锚前沿土体累积塑性应变增多,水平承载力下降越多。

工况 1 土体在循环荷载作用前后土体有效应力云图及有效应力变化值如表 4 所示。从表 4 中可以看出循环荷载作用后,土体有效应力减小,工况 2、工况 3、工况 4 土体也有相同趋势。由此可知,循环荷载作用后重力锚水平承载力降低的主要原因是,循环荷载作用下重力锚锚底面土体产生超孔隙水压力累积的现象,而使土体的有效应力减小,导致土体的不排水强度衰减。根据黏性土上重力锚水平承载力计算公式可知,在保持重力锚的锚底面积、锚底面宽度和锚埋入深度不变的情况下,锚底土体不排水强度的衰减会造成重力锚水平承载力的下降。与此同时,循环荷载作用下重力锚前沿土体产生累积塑性应变,锚前沿土体产生塑性区使重力锚的水平承载力降低。

表 4 工况 1 有效应力汇总

荷载条件	有效应力云图	应力/Pa	
		最小值	最大值
循环荷载作用前		869.3	49120
循环荷载作用后		654.1	49080

根据表 1 可知,土体从工况 1 到工况 4,其弹性模量、黏聚力和内摩擦角都随之减小。而由上述结论可知,土体从工况 1 到工况 4,其累积超孔压和累积塑性应变逐渐减小。

## 5 不同土质参数对海床响应的影响

在研究波浪作用下重力锚下海床土体动力响应时,为了对响应规律有更深入的研究,改变计算参数,并对不同参数下重力锚外超孔隙水压力和塑性应变的变化规律进行比较。

### 5.1 超孔隙水压力的影响因素

分别计算了不同海床弹性模量(见表 5)、黏聚力(见表 6)、内摩擦角(见表 7)下超孔隙水压力的变化。在保持其他土体参数不变,只变化某一参数的条件下,取重力锚锚下土体中的同一监测节点进行模拟计算,并将超孔隙水压力数值结果进行对比分析。

表 5 不同弹性模量下超孔压比汇总

弹性模量 $E/\text{MPa}$	5.37	7.80	10.23
累积超孔压比	0.8436	0.7468	0.6326

表 6 不同黏聚力下超孔压比汇总

黏聚力 $c/\text{kPa}$	20	23	26
累积超孔压比	0.7469	0.7423	0.7415

表 7 不同内摩擦角下超孔压比汇总

内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	14.8	17.25	19.7
累积超孔压比	0.7471	0.7469	0.7468

从表 5 中可以看出,随着弹性模量的增大,累积超孔压比越小,即超孔隙水压力的累积越不明显。其原因是当黏土的弹性模量较小时,在荷载作用下土体发生较大变形,且其渗透系数较小,使得孔隙水压力无法及时消散而使孔压增大,这与康环龙<sup>[19]</sup>所提理论相符。

从表 6 中可以看出,随着黏聚力的增大,黏性土中累积超孔隙水压力比越小,即超孔隙水压力的累积越不明显。其原因是当循环荷载作用于黏性土上时,土体的黏聚力越大,其内部结构越稳定即土体结构越不容易被循环动荷载扰动,从而使累积超孔压比值越小。

从表 7 中可以看出,超孔隙水压力都出现累积,但随着内摩擦角的增大,累积超孔隙水压力有所减少,但变化不明显。其原因是土体内摩擦角越大时,在荷载作用下土体变形越不明显,可以将水更迅速的排出,因而累积超孔压比减小。

### 5.2 塑性应变的影响因素

在保持其他参数不变的条件下,取同一监测节点进行模拟计算,并将塑性应变数值结果进行对比分析(见图 7)。

从图 7 中可知,随着弹性模量的增大,重力锚前沿土体的累积塑性应变数值在增大。康环龙<sup>[19]</sup>曾指出黏性土弹性模量越小时土体也越软。因此,弹性模量越小的黏性土可以更及时的把循环动荷载产生的位移传递出去,所以弹性模量越小其累积塑性应变值也越小。

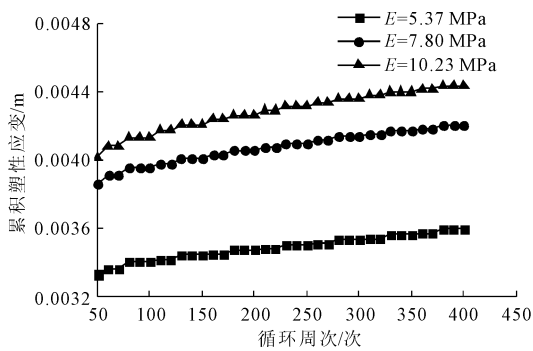


图7 不同弹性模量时累积塑性应变图

随着黏聚力的增大,重力锚前沿土体的累积塑性应变数值在减小。其原因主要是因为当黏土的黏聚力较小时,土体颗粒之间连结力也越小,因而,土体的抗剪强度也越小,土体发生更大的变形,即塑性应变累积越明显。

随着内摩擦角的增大,重力锚前沿土体塑性应变增长越小,即累积塑性应变越小。其原因是土体内摩擦角越大时,在荷载作用下土体结构越不易发生扰动,累积塑性应变也就越小。

## 6 结论

(1) 波浪荷载对SPM重力锚承载力的影响十分显著,在波浪荷载作用下,重力锚的水平承载力会下降,下降值有时大于原承载力的50%。前人对于重力锚的研究都建立在静力分析基础上,因此,对重力锚的特性进行动力分析十分必要。

(2) 重力锚周围海床土体产生累积超孔隙水压力和累积塑性应变是重力锚承载力下降的主要原因。循环荷载作用下,重力锚周围海床土体产生呈波动式上升的超孔隙水压力,既有振荡又有积累,累积超孔压比最高可达0.9左右。与此同时,土体的有效应力减小,从而使土体的不排水强度减小,重力锚水平承载力也因此降低。并且,在循环荷载作用下,重力锚前沿海床土体产生塑性应变,且随着循环周次的增加,其塑性应变产生累积,导致重力锚水平承载力下降。

(3) 重力锚周围海床土体的累积超孔压比随着弹性模量、黏聚力和内摩擦角的增大而减小。弹性模量越大,重力锚前沿土体的累积塑性应变数值也越大;然而随着黏聚力和内摩擦角的增大,重力锚前沿土体的累积塑性应变数值在减小。

### 参考文献:

[1] Upsall B, Horvitz G, Riley B, et al. Geotechnical Design: Deep Water Pontoon Mooring Anchors[C]//Proceedings ports

2013: Success through diversification, USA: ASCE, 2013: 1087-1096.

- [2] 李 飒,竺新文,李怀亮,等.水平荷载作用下重力锚室内模型试验及数值模拟分析[J].中国海上油气,2018,30(2):152-157.
- [3] 竺新文.重力锚室内模型试验及数值模拟研究[D].天津:天津大学,2017.
- [4] 李怀亮,黄山田,王晓飞,等.重力锚水平承载力特性的有限元分析[J].中国港湾建设,2016,36(1):6-9.
- [5] 徐保照.钙质土中锚固基础设计研究[D].天津:天津大学,2014.
- [6] 李 飒,段高松,李怀亮,等.复合荷载作用下重力锚的抗滑稳定计算[J].土木建筑与环境工程,2018,40(2):40-45.
- [7] 叶邦全.海洋工程用锚类型及其发展综述[J].船舶与海洋工程,2012(3):1-7.
- [8] 谢铜辉,杨料荃.浮式生产储油卸油装置单点系泊系统综述[J].海洋工程装备与技术,2014,1(3):189-194.
- [9] 张俊生,滕 斌,丛培文.浅水中浮体在波浪作用下运动的三维时域计算模型[J].海洋工程,2016,34(1):1-9.
- [10] 郑妍颖.含裙板锚泊浮筒的动力响应分析[J].广东造船,2015,34(2):45-47.
- [11] 李晶鑫,方祥位,申春妮,等.波浪荷载作用下频率对饱和珊瑚砂动力特性影响研究[J].水利与建筑工程学报,2018,16(5):92-98.
- [12] 王忠涛,周思超.随机荷载作用下饱和松砂的动力特性试验研究[J].水利与建筑工程学报,2015,13(5):55-59.
- [13] Ye J, Jeng D S, Wang R, et al. Numerical simulation of the wave-induced dynamic response of poro- elastoplastic seabed foundations and a composite breakwater[J]. Applied Mathematical Modelling, 2014,39(1):322-347.
- [14] Scholtès, Luc, Chareyre B, Michallet, Hervé, et al. Modeling wave-induced pore pressure and effective stress in a granular seabed[J]. Continuum Mechanics and Thermodynamics, 2015,27(1/2):305-323.
- [15] Namazi - Saleh F, Kurian J V, Zahiraniza M B. Investigation of vortex induced vibration of offshore pipelines near seabed[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014,567: 265-270.
- [16] 胡 翔,陈锦剑.波浪荷载下海底单桩与土共同作用的数值分析[J].岩土工程学报,2015,37(S2):217-221.
- [17] 郭俊杰,周香莲,徐 风,等.三维波浪作用下土体动态响应[J].水利学报,2015,46(S1):278-283.
- [18] 高 军.饱和黏土累积塑性应变非线性预测模型研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(S1):3534-3540.
- [19] 康环龙.桶形基础周围土体对浅海动载响应的数值模拟研究[D].北京:中国地质大学(北京),2015.