

曹妃甸深槽斜坡稳定性影响因素敏感性分析*

方中华^{1,2}, 褚宏宪^{1,2}

(1. 青岛海洋地质研究所 国土资源部天然气水合物重点实验室, 山东 青岛 266071;

2. 青岛海洋科学与技术国家实验室 海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东 青岛 266071)

摘 要:海洋灾害地质因素中,虽然海底滑坡发生频率不高,但造成的灾害损失往往会较严重,斜坡的稳定性受众多因素综合影响,且各因素对斜坡稳定性的影响程度存在差异,其敏感性分析一直是国内外研究的重要内容。本文以曹妃甸深槽海底斜坡为研究对象,分析了水下斜坡稳定性的影响因素。应用滑坡稳定性分析软件 Geo-Slope 对黏聚力、内摩擦角、重度、坡度等内在敏感因素以及地震动参数、附加荷载和波高这 3 个外在敏感因素进行了单因素敏感性分析,认为内在因素中内摩擦角最为敏感,外在因素中地震动参数的敏感度最高。通过对水下斜坡稳定性影响因素及其敏感性分析,可为海底滑坡的防治规划提供依据。

关键词:海底斜坡;影响因素;Geo-Slope;敏感性

中图分类号: P75

文献标识码: A

doi:10.3969/j.issn.1002-3682.2016.03.003

斜坡稳定影响因素的敏感性分析是目前滑坡研究的热点问题之一,很多专家学者选择不同区域或类型的海底斜坡进行了较深入的研究^[1-4]。影响斜坡稳定性的多种因素,不管是内因还是外因,与斜坡稳定系数之间都存在相关性,对相关因素作敏感性分析就是定量分析其变化对于斜坡稳定系数的影响程度。对影响因素作敏感性分析,特别是对主要影响因素作敏感性分析,可以找出斜坡失稳的主导因素,使斜坡的滑坡治理和优化设计更为经济、安全和有效^[5]。因此,对影响因素作敏感性分析在滑坡及滑坡治理工程中是必要的。

影响水下斜坡稳定的因素较多,且各因素存在复杂性及不确定性。总的来说,海底滑坡灾害的发生不仅与地形地貌,地层岩性等内因(环境因子)有关,而且与波浪等水动力条件、地震和人类工程活动等外因(触发因子)也有较强的关联性,往往是它们共同作用的结果^[6]。在一定的工程地质条件下,影响因素对滑坡失稳的贡献是存在差异的,有的影响大,有的影响要小很多。

本文以曹妃甸深槽斜坡为研究对象,在自然状态条件下考虑了黏聚力、内摩擦角、重度、坡度等内在因素对斜坡稳定性的影响,并分析了地震动参数、附加荷载和波高这 3 个外在敏感因素的影响,应用 Geo-Slope 滑坡稳定性分析软件对斜坡进行单因素敏感性分析。此敏感性的分析,将为海底滑坡的防治规划提供依据。

* 收稿日期:2016-04-28

资助项目:国家自然科学基金项目——曹妃甸甸头深槽海底滑坡及稳定性研究(41276060)

作者简介:方中华(1982-),男,工程师,硕士,主要从事海洋地质地球物理调查方面研究。E-mail: fzhouc@sina.com

(李 燕 编辑)

1 研究区域背景

研究区位于曹妃甸甸头深槽海域,海底的地形和地貌较复杂,属于现代海洋动力地貌体,曹妃甸深槽地貌由曹妃甸浅滩和甸头前沿深槽组成^[7]。曹妃甸亦名沙垒田岛,因岛上原有曹妃庙而得名。曹妃甸原是一座带状离岸沙岛,呈东北-西南走向,原始面积约 5 km²,为古滦河入海冲积而成。曹妃甸沙岛位于唐山市南部,距离大陆岸线约 18 km,地理坐标 38°55'N,118°30'E。从 2003 年起为建设曹妃甸港口工业区,开始了大面积填海造陆,原有的滩海地貌已不复存在,取而代之的是与陆相连的现代工业港城,但是,曹妃甸原有的岬角地貌特征在大规模的工程建设下不仅得以保留,而且岬角效应更为突出(图 1)。工程建设后,甸头呈三角形突出于海中,甸头南侧深槽走向呈近东西向分布,是渤海湾最深的水域,深槽底部为侵蚀洼地,洼地呈三角形条带分布,沟槽北陡南缓,深槽区域临近码头,30 m 等深线距曹妃甸甸头不足 500 m^[8]。

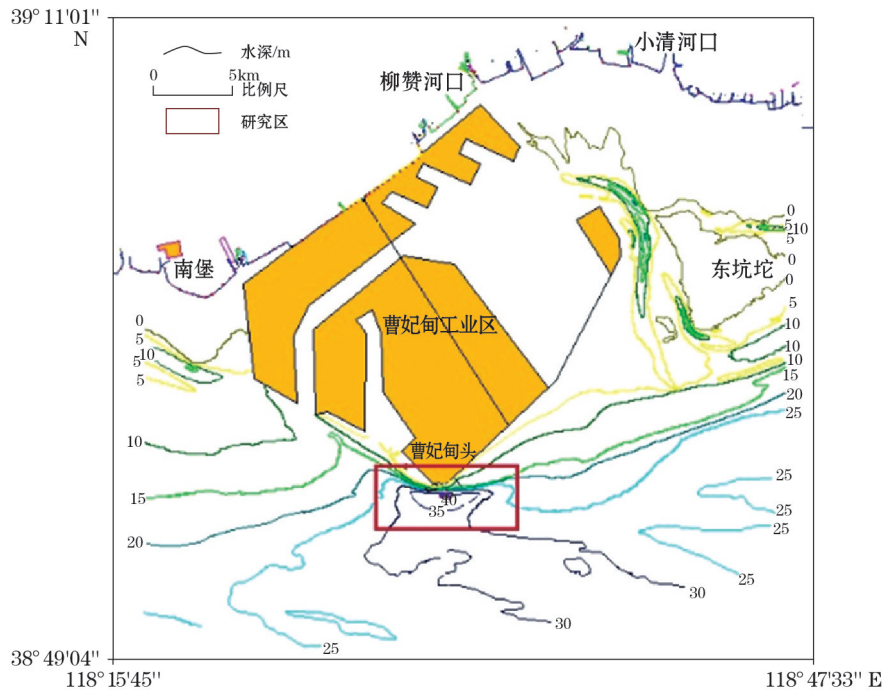


图 1 研究区位置及水深地形图

Fig. 1 Location and bathymorphological map of the study area

曹妃甸在早第三纪时,它以隆起为主,有较薄的东营组沉积。晚第三纪以来拗陷作用逐步取代了断陷作用,该区也逐步形成一个统一的拗陷沉积区。接受了厚 1.2 km 左右的第三系和第四系沉积^[9],其中,第四系厚度普遍在 300~450 m。

根据矿石码头勘察资料,海底斜坡区地层较复杂,从海底面往下 80 m 以内共划分 6 个层位(图 2),土的分类标准依照《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001)^[10],自上而下详细描述如下:

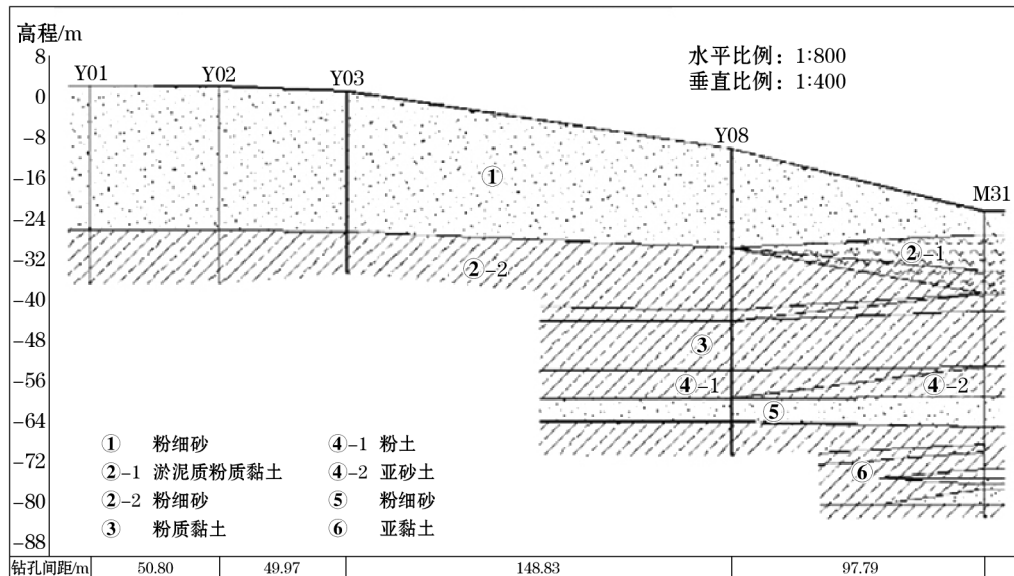


图 2 穿过钻孔的地质剖面图

Fig. 2 Geological profile through the borehole

1) ①粉细砂

灰褐色~褐色,饱和,松散~中密状态,靠近沙岛为中密状态,远离沙岛深水区为松散~稍密状态,以粉砂为主,夹粉质黏土薄层,含少量贝壳碎片,分布不均匀,主要分布曹妃甸沙岛区。层底标高一般在 $-3.0\sim-36.5$ m,厚度为 $3\sim28$ m,由曹妃甸向南逐渐变薄。工程地质性质一般。

2) ②-1 淤泥质粉质黏土

灰色,软~可塑状,中~中上塑性,顶部混多量粉细砂,砂粒含量为 87.1% ,夹粉细砂薄层,上部土质不均。孔隙比平均值为 1.12 。该层分布不连续,在深水区该地层缺失。层底标高一般在 $-28\sim-33$ m,厚度为 $2\sim5$ m。工程地质性质较差。

3) ②-2 粉细砂

灰褐色~褐色,饱和,松散,局部稍密状,局部以中砂为主,含贝壳碎屑及少量淤泥质土,该层层位稳定,分布连续。层底标高一般在 $-34\sim-45$ m,厚度约为 $5\sim10$ m。工程地质性质稍好。

4) ③粉质黏土

褐灰色,灰色,可塑状为主,中~中上塑性,混夹多量粉细砂和粉土透镜体,土质不均,该层层位稳定,分布连续。层底标高一般在 $-47\sim-53$ m,厚度约为 $6\sim13$ m。工程地质性质稍好。

5) ④-1 粉土

褐灰色,褐色,密实状,含粉细砂颗粒、少量贝壳碎屑及云母碎片,夹黏性土薄层,分布不连续,厚薄不均,层面起伏较大,分布不连续,局部夹有黏土和粉细砂透镜体,主要分布曹妃甸沙岛和浅水区。层底标高一般在 $-52\sim-56$ m,厚度约为 $2\sim9$ m。工程地质性质较好。

6)④-2 亚砂土

灰白色,中密—密实状,以粉砂为主,低塑性,含少量黏性土分布不连续,主要分布远离曹妃甸沙岛深水区。层底标高一般在 $-55\sim-60$ m,厚度约为 $2\sim 9$ m。工程地质性质较好。

7)⑤粉细砂

浅褐—灰黄色,饱和,中密,均匀,局部为砂质粉土,该层层位稳定,分布连续。层底标高一般在 $-63\sim-66$ m,厚度约为 $6\sim 9$ m。工程地质性质较好。

8)⑥亚黏土

褐灰色,灰褐色,灰色以及褐色,密实状,硬塑状,中塑性,含少量云母碎片,可见少量铁质浸染,夹粉土及粉细砂薄层,该层分布连续,层位稳定。工程地质性质较好。

2 水下斜坡稳定性影响因素

2.1 地形地貌影响因素

曹妃甸近海地形起伏大,在河流和海洋水动力条件下形成了极为丰富的地貌类型(图1),不仅有水下三角洲、潮流沙脊,还有在强潮流作用下形成的深槽等地貌。曹妃甸深槽海区地形地貌的发育受到了地质构造、古滦河三角洲演变、海洋水动力和人类活动等内外营力的共同控制作用。海底深部构造的沉陷是形成曹妃甸深槽海区地形地貌的基础,在海洋水动力作用下古滦河废弃三角洲演变形成了曹妃甸岬角地貌,曹妃甸工程建设对潮滩的淤积作用明显,并使深槽区处于冲刷环境^[11]。

通过2004,2008和2013年的水深资料对比分析,深槽海域等深线总体保持了原有形态,深槽轴线位置没有明显移动,深槽洼地区处于轻微冲刷,近10 a间,35 m等深线向南移动约100 m,40 m等深线面积增加1.3倍(图3),深槽最大冲淤速率 -19 cm/a。海底斜坡在侵蚀作用下会进一步变陡,其稳定性将降低,发生滑坡的危险性将增大,很可能在风暴潮或地震等外力触发下发生滑坡,给曹妃甸港的安全造成隐患和巨大的经济损失。

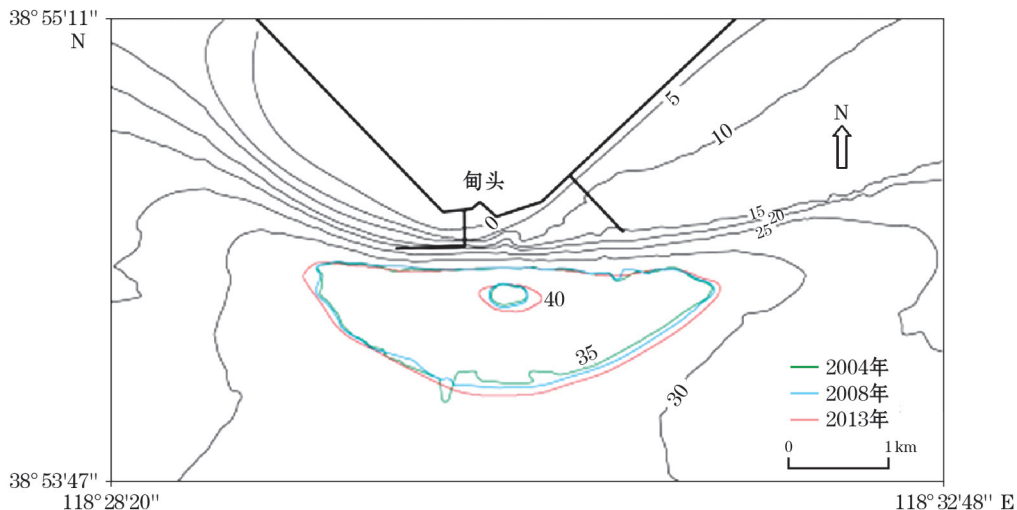


图3 深槽等深线(m)变化图

Fig. 3 Bathymetric chart(m) of the Caofeidian deep groove

2.2 地层岩性影响因素

在该区域基底构造埋藏很深,其上的第三系、第四系地层广泛发育。海底往下有着数百米的海陆交互相地层,其中第四系全新统(Q_4)底高程约在-30 m,上更新统(Q_3)底高程约在-140 m。这种地层的形成不仅与第四纪以来发生在该区域的多次海进海退有关,也与古滦河带来的大量泥沙密不可分。

斜坡为海底土质斜坡,多为砂土层,还有淤泥质粉质黏土等软弱夹层,地层透水性强,持水性好,在地下水(主要是海水)侧向补给作用下,含水量的增加使堆积物的强度,尤其是抗剪强度下降明显,地层变得易滑。

2.3 波浪影响因素

曹妃甸海域波浪以风浪为主,涌浪为次。据观测资料统计:常浪向为 S,频率 10.87%;次常浪向为 SW,频率 7.48%;强浪向为 NEE,最大波高 4.9 m,该方向波高大于或等于 1.5 m 的出现频率为 1.63%;次强浪向为 NE,最大波高 4.1 m。

包括风暴潮在内的波浪荷载是海洋地基土受到的最频繁和最严峻的动荷载,海底斜坡土体的失稳大多与其相关。波浪荷载导致海底斜坡失稳主要有两方面的原因:1)大风浪和潮位的较大变化往往激发了海底表层沉积物活动性,同时,也增加了土体的滑动剪切应力;2)大风浪和潮位的较大变化使土体内产生超孔隙水压力,有效应力随之减小,致使斜坡土体的抗剪强度下降。在波浪动荷载作用下,随着下滑力的加大和土体的抗剪强度下降,海底斜坡浅部土层产生滑坡的可能性将大大增加^[12]。

2.4 地震影响因素

研究区位于唐山大地震震中东南方约 100 km 处,为 VII 度地震烈度区。地震烈度描述的是地震对地面及建筑物的破坏程度,这是有别于震级的,相同震级的地震发生在不同区域,产生的破坏往往有较大的区别,同一次地震,在不同区域产生的破坏也不一样,一般来说,越靠近震源,破坏就大,地震烈度就高;越是远离震源,破坏就小,地震烈度就低。研究区浅表层砂土均为粉质砂土,其土的渗透性能差,当地震发生时,孔隙水压力在瞬间上升,又来不及消散,研究区内的浅表层砂土易液化,所以在地震发生时,斜坡浅表层稳定性将大大降低。

2.5 人类工程活动影响因素

研究区内人类工程活动较强烈,曹妃甸港主体设施建设从 2004-04-25 起在海上吹填造陆,历时 19 个月,于 2005-12-01 完工,建成 2 座 25 万吨级矿石泊位;矿石码头从 2005-12 正式开航运营,总长 808 m 的矿石码头采用高桩梁板式结构,其中靠泊岸线长度 735 m,码头前沿停泊水域水深超过 25 m,码头及堆场区平面标高为 5 m。附加荷载作用宽度按码头的实际位置,南至水深 25 m 处,北至近岸堆场,荷载作用宽度约 500 m,因码头区与堆场区基础形式不同,荷载存在差异,北侧近岸堆场区荷载力小,南侧码头荷载力作用力大。附加荷载增加了土体的容重,破坏了土体的抗剪强度,可能诱发滑坡发生。

3 斜坡稳定性影响因素敏感性分析

3.1 影响因素敏感性分析方法

滑坡的发生往往是内因和外因共同作用的结果^[13],但不同因素对滑坡的影响是存在

差异的,为了弄清不同因素对滑坡的影响程度,拟采用单因素敏感性分析的方法,结合该滑坡工程实践,对影响海底滑坡的因素,特别是主要影响因素作敏感性分析和研究。滑坡影响因素的敏感性一般用敏感度 S 来衡量,它指的是某种因素的相对变化率与滑坡稳定性系数的相对变化率之间的比值,可表示如下^[14]:

$$S = \left| \frac{\Delta K}{K} \right| \left/ \left| \frac{\Delta X}{X} \right| \right., \quad (1)$$

式中, $\left| \frac{\Delta K}{K} \right|$ 为稳定系数 K 的相对变化率; $\left| \frac{\Delta X}{X} \right|$ 为影响因素 X 的相对变化率。

敏感性分析可通过以下几步来完成:1)依据勘察实验数据来选取一套基准参数;2)采用极限平衡理论,通过数值模拟运算方法计算出基准条件下的滑坡稳定性系数 K ;3)保持其他因素水平不变,将滑坡的影响因素中的某一个参数在基准值附近变化,计算出此情况下的稳定性系数 K ;4)根据式(1)求得各因素的敏感度 S 。

3.2 影响因素敏感性分析

在众多影响海底滑坡稳定性的因素中,选取了滑坡体岩土力学参数黏聚力 c 、内摩擦角 φ 、重度 γ 、坡度 i 、波高 H 、地震动参数 K_E 以及附加荷载 G 等主要影响因素进行敏感性分析和研究,其中黏聚力 c 、内摩擦角 φ 、重度 γ 、坡度 i 是内在因素(环境因素),而波高 H 、地震动参数 K_E 以及附加荷载 G 是外在因素(触发因素)。

研究区的勘察资料表明,研究区内土体物理力学参数具有较大的分散性,我们采取强度参数平均值作为基准,坡度角以现有地形的坡度为基准,波高以 5 a 一遇波高为基准,地震动参数以曹妃甸海区地震设防烈度 VII 为基准。附加荷载作用宽度按码头的实际位置,南至水深 25 m 处,北至近岸堆场,荷载作用宽度约 500 m,因码头区与堆场区基础形式不同,荷载存在差异,北侧近岸堆场区荷载力小,南侧码头荷载力作用力大,依据《水工建筑物荷载设计规范》(DL 5077—1997)^[15],堆场区荷载按土石坝考虑取 20 kN/m³,码头区荷载按钢筋混凝土地基考虑取 25 kN/m³。以这些基准参数作为基准模型参数,利用 Geo-Slope 滑坡稳定性分析软件,计算出一个安全系数作为安全系数的基准值,然后在保持其它因素水平不变的情况下,只让某一个参数在基准值附近指定的范围以相同的步长变化,本文选取 0~10% 范围内变化,计算出此情况下的稳定性系数;最后根据式(1)求得各因素的敏感度。

从图 4 和表 1 可以看出,内在因素中,内摩擦角对该斜坡稳定性最为敏感,坡度次敏感,重度稍敏感,黏聚力的敏感度最低;外在因素中,地震动参数比附加荷载敏感,但附加荷载的敏感性远远高于波高的敏感性。其敏感性排序依次为地震动参数 K_E 、内摩擦角 φ 、坡度 i 、重度 γ 、附加荷载 G 、黏聚力 c 、波高 H 。

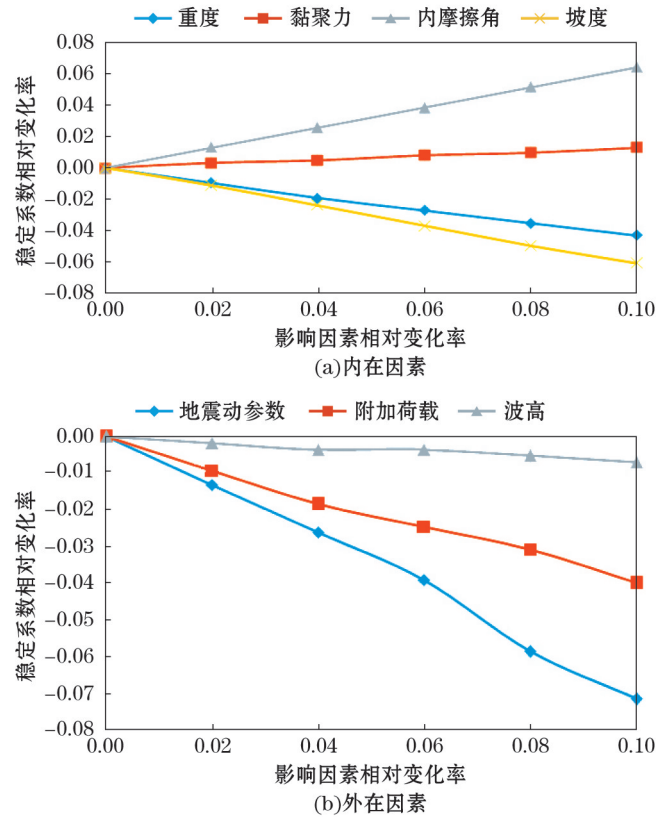


图 4 各因子敏感性分析结果

Fig. 4 Results of sensitivity analysis of the influencing factors

表 1 参数敏感度分析表

Table 1 Table of parameter sensitivity analysis

参 数	敏感度值	敏感性排序
黏聚力	0.13	6
内摩擦角	0.64	2
重 度	0.43	4
坡 度	0.61	3
波 高	0.07	7
地震动参数	0.72	1
附加荷载	0.41	5

4 结 论

滑坡的发生不仅与原生地质条件息息相关,而且外部触发因素往往起着至关重要的作用。本文采用单因素敏感性分析方法和 Geo-Slope 滑坡分析软件对滑坡稳定影响因子进行敏感性分析,这种方法对工程技术人员来说是一种较实用的分析方法,因为它具有工

作量小、易于完成,具有一定的通用性的特点。实例分析表明,影响曹妃甸甸头深槽斜坡稳定性的主要因素其敏感性排序依次为地震动参数 K_E 、内摩擦角 φ 、坡度 i 、重度 γ 、附加荷载 G 、黏聚力 c 、波高 H 。

在海底斜坡区进行海洋工程建设时,对影响斜坡稳定性的敏感性因素进行敏感度分析是十分必要的,它有助于我们分析研究滑坡发生变形破坏的形成机制,弄清楚诱发主因,这对海底斜坡的治理设计具有重要意义。本文没有考虑参数的相关性对其稳定性的影响,考虑参数的相关性可以使稳定性分析模型更接近于工程实际,提高对滑坡稳定系数的计算精度,在今后的工作可以考虑进行因素间有交互作用时的分析,这有助于提高滑坡治理的效果,使其更可靠、经济和合理。

参考文献:

- [1] 马显春,王雷,赵法锁. 滑坡稳定影响因子敏感性分析及治理方案探讨[J]. 地质力学学报,2008,14(4):381-388.
- [2] 雷迪. 库岸斜坡稳定性影响因素敏感性分析[J]. 人民长江,2014,45(增1):95-97.
- [3] LOCAT J, BRONHOLD B, HART B, et al. COSTA-Canada, a Canadian contribution to the study of continental slope stability: an overview[C]// Proceedings of the 54rd Canadian Geotechnical Conference. Canada,2001:730-737.
- [4] 胡光海. 东海陆坡海底滑坡识别及致滑因素影响研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2010.
- [5] 杨光华,张玉成,张有祥. 变模量弹塑性强度折减法及其在斜坡稳定分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(7):1506-1512.
- [6] 张咸恭,王思敬,张倬元,等. 中国工程地质学[M]. 北京:科学出版社,2000.
- [7] 吴澎,姜俊杰,曹妃甸港区选址研究[J]. 水运工程,2011,9(9):457-458.
- [8] 陆永军,季荣耀,左利钦,等. 曹妃甸深水大港滩槽稳定及工程效应研究[J]. 水利水运工程学报,2009(4):34-45.
- [9] 刘晓东. 河北曹妃甸海域地形地貌与灾害地质风险评价[D]. 青岛:国家海洋局第一海洋地质研究所,2012.
- [10] 岩土工程勘察规范:GB 50021-2001[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [11] 方中华. 曹妃甸甸头深槽灾害地质因素研究及稳定性分析[D]. 青岛:中国海洋大学,2014.
- [12] 史慧杰,褚宏宪,高小惠. 海底斜坡稳定性研究进展及分析[J]. 海洋地质前沿,2013,29(3):44-45.
- [13] 方玉树,家愉. 斜坡稳定性若干问题[J]. 重庆建筑,2007,39(1):40-43.
- [14] 谢立辉,欧名贤. 工程斜坡的稳定性分析及抗滑桩的应用研究[J]. 长沙大学学报,2003,7(4):70-73.
- [15] 水工建筑物荷载设计规范:DL 5077-1997[S]. 北京:中国电力出版社,1998.

Sensitivity Analysis of the Factors Affecting Slope Stability in the Caofeidian Deep Groove

FANG Zhong-hua^{1,2}, CHU Hong-xian^{1,2}

(1. *Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environmental Geology, Ministry of Land and Resources, Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China;*

2. *Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China*)

Abstract: Of marine geological disaster factors, the submarine landslides do not occur frequently, but the disaster losses caused by them are often more serious. The slope stability can be comprehensively influenced by many factors and the influence degree of these factors is different. Therefore, the sensitivity analysis of factors influencing the slope stability has always been one of the important aspects at home and abroad. By taking the slope of the Caofeidian deep groove as the research object, the factors influencing the stability of underwater slope are analyzed. By using the software Geo-Slope, a single-factor sensitivity analysis is made of intrinsic sensitivity factors such as cohesive strength, internal friction angle, density and falling gradient and three external sensitive factors including seismic coefficient, additional load and wave height. The results show that the internal friction angle of the intrinsic sensitivity factors is the most sensitive and the seismic coefficient of the external sensitive factors is the highest in sensitivity. This sensitivity analysis will provide the basis for the control program of submarine landslides.

Key words: submarine slope; influencing factors; Geo-Slope; sensitivity

Received: April 28, 2016