

Newmark 位移分析方法在海底斜坡地震稳定性评价中的应用

褚宏宪,方中华,史慧杰,李攀峰

(国土资源部海洋油气与环境地质重点实验室,青岛 266071;
海洋国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室,青岛 266061;
中国地质调查局青岛海洋地质研究所,青岛 266071)

摘要:Newmark 地震动力时程分析方法能够考虑自然地震波峰值地面加速度(PGA)、持续时间、地震频率的影响,可以输入不同地震波进行模拟计算,计算了曹妃甸典型海底边坡在发生类似唐山地震的烈度情况下动力响应,得出的位移值大小可以定量的反映地震对场地边坡的影响,根据海底斜坡或坡顶建筑物的允许位移值,可以将其作为安全稳定分析的判断指标,可以为类似边坡稳定性评价、近海工程建设等提供重要的参考作用。

关键词:地震;海底斜坡;稳定性;Newmark;位移

中图分类号:P634.4⁺43

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2017.06008

边坡地震稳定性分析是岩土工程和地震工程领域的重要课题,由于问题本身的复杂性和涉及多个学科的交叉性,使得现阶段边坡地震稳定分析还处于不成熟阶段,在实际应用中,并没有统一、可靠的标准可遵循^[1-3]。近岸海底斜坡往往易发生海底滑塌、滑坡等海洋地质灾害,海底斜坡稳定性评价工作逐渐得到重视,由于海底斜坡受到多种外部环境条件影响和控制,因此需要模拟多种工况环境,输入模型边界外力条件。外界影响条件主要包括分析海底斜坡自身重力、海平面变化、波浪作用、建筑物附加荷载和地震力作用等条件^[4]。其中地震等外力触发下易发生海底滑坡等地质灾害,是影响海底斜坡稳定性的重要因素。地震能够诱发引起边坡失稳的惯性力,由于瞬态

荷载(即循环应变)或超孔隙水压力的产生而导致土体的抗剪强度降低,地震荷载和剪切强度变化的综合作用会导致边坡稳定性下降。通常,循环荷载使得松散的饱和土体(碎石土、砂土、粉土等)产生超孔隙水压力,这会导致土体液化且与地震前相比土体强度会发生相当大的损失。然而,黏性土和干燥的无黏性材料受循环载荷的影响程度不会达到上述土体的程度。如果黏土不敏感,在大多数情况下看来,至少有百分之八十的静态剪切强度将在循环加载后保留^[5]。

目前,地震对边坡稳定的影响分析采用静力、拟静力、以及地震动力时程分析等多种方法。斜坡稳定性分析中有许多不确定的因素,传统的安全系数法无法反映岩土参数的不确定性^[6],本文利用加拿大 GeoStudio 软件采用 Newmark 地震动力时程分析方法计算曹妃甸头前沿边坡在设防烈度和预估的罕遇地震烈度下的动力反应,分析了边坡的动力稳定性。采用地震震级、持续时间和变形位移值等指标评价了海底斜坡的安全性。

收稿日期:2017-03-23

基金项目:国家自然科学基金(41276060);国家专项(DD20160144)

作者简介:褚宏宪(1973—),男,硕士,教授级高级工程师,主要从事地球物理调查研究工作。E-mail: chx-8@163.com

1 海底斜坡地震稳定性评价主要方法

1.1 拟静力法

拟静力法是用于评价边坡动力稳定性的最简单的方法,用静力学方法近似解决动力学问题^[7-9]。它发展较早,迄今仍然被广泛使用。其基本思想是在静力计算的基础上,将地震作用简化为一个水平和竖向惯性力作用在分析对象上,应用于极限平衡分析方法当中,如图 1 所示, k_h 和 k_v 分别代表水平和竖向地震系数(单位是 g),地震力的大小等于地震系数乘以滑动土体重度。典型的地震力作用于水平方向,即 $k_v = 0$ 。安全系数用传统的条分法进行计算。采用这种方法最大的困难在于选取合适的地震系数以及确定可接受的安全系数值。

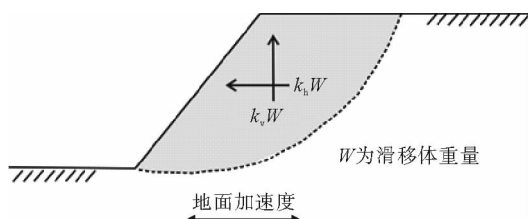


图 1 拟静力法地震荷载图示

Fig. 1 Seismic load by the Pseudo-static method

拟静力法能在有限程度上反映荷载的动力特性,但不能反映各种材料自身的动力特性以及结构物之间的动力响应。拟静力法的优点在于其物理概念清晰,与全面考虑结构物动力相互作用的分析方法相比,计算方法较为简单,计算工作量很小、参数易于确定,并积累了丰富的使用经验。拟静力法进行边坡动力稳定性评价不能用于地震时土体刚度有明显降低或者产生液化的情况。

1.2 Newmark 位移分析方法

Newmark 位移分析方法基于 Newmark 在 1965 年提出的概念^[1,2,4],当边坡的实际加速度大于静态屈服加速度时会生成永久位移。Newmark 方法是拟静力分析方法的扩展,通过考虑了边坡滑体的地震加速度历程。选择能够代表场地

地震运动的加速度时程曲线,然后对比屈服加速度来决定永久位移。该方法假定:①边坡存在明确的滑动面;②边坡体为刚性或者理想塑性材料;③地震过程中剪切强度损失可以忽略;④如果地震应力超过剪切抗力就会发生永久应变。同时假定边坡只向下游方向变形。

Newmark 位移分析方法首先需要通过传统的极限平衡条分法找出最危险滑面的屈服加速度或者临界地震系数 k_y ,这个值可以通过地震系数敏感性分析得到。方法的难点在于选择合适的加速度时程曲线来模拟边坡的地震运动。选定加速度时程曲线就可以对最危险滑面超过临界加速度的部分进行双重积分计算永久位移。

这里对 GeoStudio 程序进行 Newmark 分析的计算过程进行阐述。进行 Newmark 分析,需要耦合 GeoStudio 程序的 QUAKE/W 模块和 SLOPE/W 模块,首先求得的边坡的动应力。静应力可从初始原位应力的具体数值得知,从 QUAKE/W 程序求得的震动应力中减去初始静应力即可得出动应力,公式为:

$$\sigma_{\text{动}} = \sigma_{\text{震}} - \sigma_{\text{静}}$$

采用条分法,每一条块底部的动应力均可计算。沿整个滑面累加就可得到总的动剪力,这就是由地震震动引起的附加剪力。

用总的动剪力除以潜在滑体重量可得到平均加速度值。该值可由地震时每一累积时步获得,并可和相应的安全系数用图表示出来(图2),与

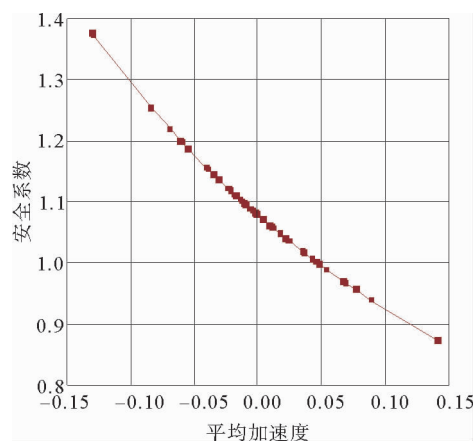


图 2 安全系数与平均加速度的关系

Fig. 2 Relationship between safety factor and average acceleration

安全系数为 1.0 对应的平均加速度称为屈服加速度 a_y 。在 QUAKE/W 分析中,平均加速度是对实际水平和垂向加速度的综合表述。由定义可知,它是可引起滑体破坏或移动的总的平均加速度。平均加速度大于 a_y 的部位,表示边坡将移动。本例中, $a_y=0.048$ 。对速度—时间曲线下的面积积分,就得到地震时的累积位移。

SLOPE/W 程序对每一个及所有试算滑面均进行上述计算,因此,就有可能找出具有最大潜在位移的试算滑面。为方便起见,试算滑面可按变形而不是安全系数来分类,以确认具有最大位移的滑面。

这里所述用来计算永久变形的程序是基于 Newmark 滑块分析法中的固有概念得来的。Newmark 分析法适用于某些特定的具体情形,该程序对于地震时土体抗剪强度不减或稍有下降的情形是理想的,分析方法不适用于由于超孔隙水压力产生或土体结构破坏而可能引起抗剪强度明显降低的情况,如松散的沙土。这种分析法对于地震过程中超孔隙水压力明显增加或抗剪强度降低 15% 以上的情形并不可靠。总的来说与拟静力法类似,Newmark 方法适用于由惯性力支配的情形,而不适用于土体弱化成为控制关键的情形。

2 海底斜坡地震稳定性评价方法比较

拟静力分析方法是目前边坡动力稳定分析应用最为广泛的分析方法,其特点是物理意义明晰、计算简单,在国内外均有成熟的技术标准可供设计参考。应用该方法的难点在于选取合适的地震系数以及确定可接受的安全系数值。地震系数在国内的不同规范和技术手册中物理意义虽然相同,但是否考虑折减系数在不同的规范中有不同的表达,同样在国外的技术手册中是否考虑折减系数以及折减系数取值亦有不同的表述,因此,需要在针对特定应用领域积累更多的经验。拟静力分析方法没有考虑竖向地震作用的影响,计算工作量很小、参数易于确定,并积累了丰富的使用经验。拟静力法进行边坡动力稳定性评价不能用于地震时土体刚度有明显降低或者产生液化的情况。

Newmark 分析方法能够考虑自然地震波峰

值地面加速度(PGA)、持续时间、地震频率的影响,可以输入不同地震波进行模拟计算,输入不同的地震波的波形对永久位移有显著的影响。Newmark 分析方法不以安全系数作为稳定分析判据,而是计算和评价地震过程中边坡的永久位移作为稳定分析的判断指标。该方法在国外的技术手册中较为常见,也积累了相当的实践经验。因此,Newmark 分析方法计算结果比较符合实际情况,相对经济合理,本文首次采用 Newmark 分析方法对曹妃甸深槽海底典型斜坡断面进行了分析计算。

3 Newmark 分析应用

根据相关地质勘察报告,对于场地沙土液化判别,表层 2~3 m 的砂土为可液化土层^[10],液化等级中等,曹妃甸北侧其他土层为不液化土层,局部夹层为粉细砂及砂土透镜体为可液化土层,粉土透镜体为非液化土层。以曹妃甸海底斜坡为研究对象,考察边坡动力稳定性,因边坡坡度较缓,自然状态下边坡全局坡比约为 1:0.055,近似 3.15°,因此,相对于边坡整体稳定,表层 2~3 m 的浅表层破坏不是分析的焦点。边坡土层整体为非液化土层,可通过 Newmark 位移分析方法对边坡的动力稳定进行综合评价。海底斜坡模型示意图见图 3,各土层土的强度指标见表 1,为模拟不同加速度时程曲线、不同地震作用时间对计算结果的影响,本次分析分别输入 3 种加速度时程曲线,其中唐山地震波加速度时程曲线如图 4 所示,其峰值加速度均调整为 0.3 g。

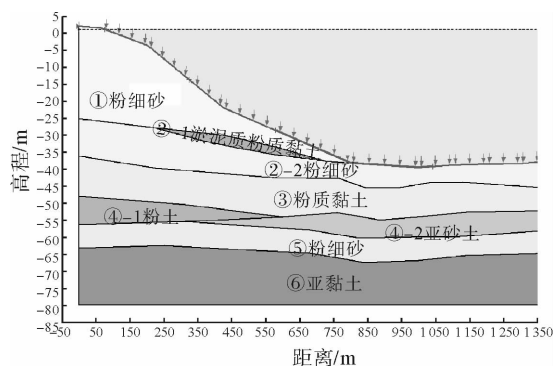


图 3 水下斜坡稳定性计算模型图

Fig. 3 The underwater slope stability calculation model

表 1 土层基本力学特性参数

Table 1 The indices of soil physical and mechanical properties

层号	土名	重度 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	泊松比	黏聚力 $c'/(\text{kPa})$	摩擦角 $\varphi'/(^{\circ})$
①	粉细砂 淤泥质	18.4	0.38	6	28
②-1	粉质 黏土	17.2	0.4	8	10.8
②-2	粉细砂	19.1	0.35	9	33.4
③	粉质 黏土	19.5	0.35	23.1	27.2
④-1	粉土	20.1	0.36	17.8	28.6
④-2	亚砂土	19.4	0.33	11	35
⑤	粉细砂	19.6	0.34	12	36
⑥	亚黏土	21.3	0.30	24.2	27.2

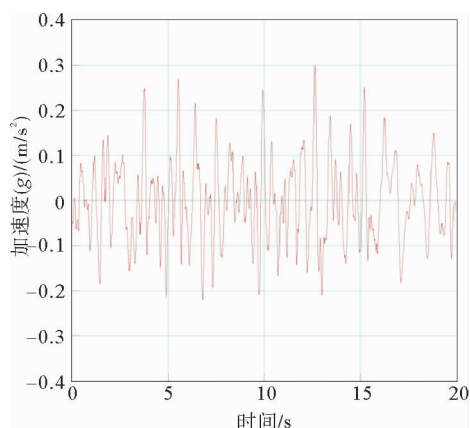


图 4 唐山地震波加速度时程曲线

Fig. 4 The graph of Tangshan earthquake acceleration time-history

①QUAKE/W 程序自带的时程曲线,地震波参数:时间间隔 0.02 s,持续时间 10 s,峰值加速度 0.3 g;

②唐山地震波,地震波参数:时间间隔 0.01 s,震级 7.8,持续时间 39.5 s,峰值加速度 55.49 g,截取 20~40 s 时间的加速度曲线;

③Imperial Valley 1940 ELC-180 地震波,地震波参数:时间间隔 0.01 s,震级 7,持续时间 39.0 s,峰值加速度 0.313 g。选取该地震波主要考虑地震震级以及峰值加速度与本项目情况相近。

采用 Nemark 方法,分别输入 QUAKE/W、唐山地震波、Imperial Valley 3 种地震波计算,滑动边坡在地震历程中会分别产生 0.22、0.53 m、0.11 m 永久位移。其中图 5~8 为采用唐山地震

波 Nemark 方法计算结果,分别给出了安全系数—平均加速度关系曲线、平均加速度—时程曲线、速度—时程曲线和滑动边坡位移—时间曲线。位移值与波形的显著关系在于在地震历程中出现超过屈服加速度的频次,对比唐山地震波和 Imperial Valley 地震波,虽然具有相同的最大峰值加速度,但唐山地震波超过 0.2 g 峰值的频次要远高于 Imperial Valley 地震波,因此,唐山地震波的作用下,边坡会产生较大的永久位移。

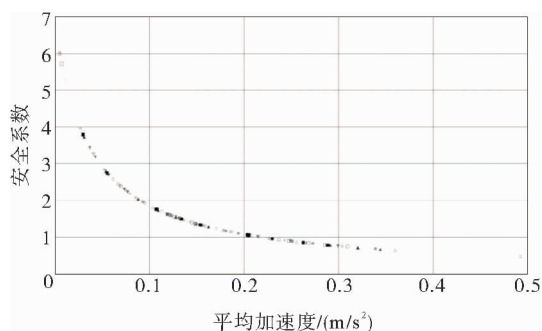


图 5 安全系数随平均加速度变化曲线(唐山地震波)

Fig. 5 The graph showing the change in safety factor with average acceleration (for Tangshan earthquake)

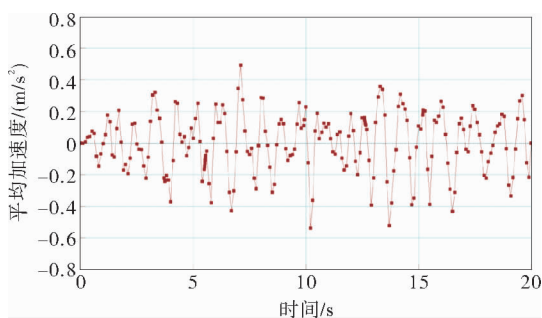


图 6 平均加速度随时间变化曲线(唐山地震波)

Fig. 6 The curve of average acceleration over time (for Tangshan earthquake)

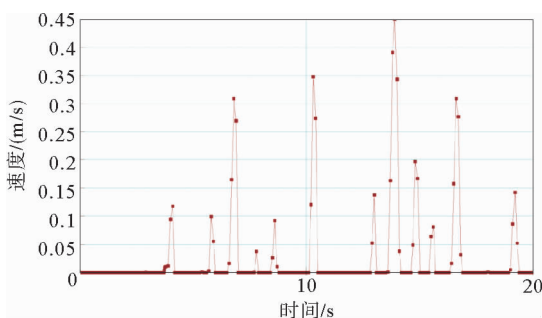


图 7 速度随时间变化曲线(唐山地震波)

Fig. 7 The velocity vs. time curve (for Tangshan earthquake)

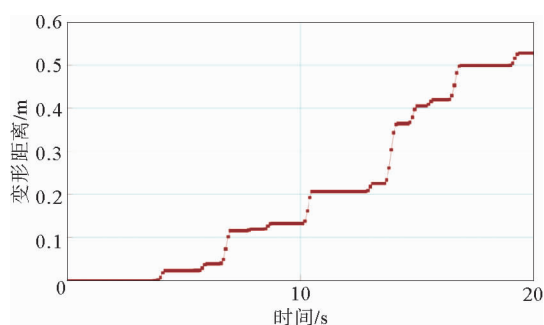


图 8 边坡永久变形曲线(唐山地震波)

Fig. 8 The curve of deformation vs. time
(for Tangshan earthquake)

目前国内外尚未有相关的规范或技术标准规定最大位移的允许值。国外通常是的做法是基于业主对特定的项目的指定的考核指标来评估最大位移的可接受性,比如项目类型、重要性等级等是考核的影响因素。

由 Newmark 方法计算的位移值大小可以定性的反映地震对场地边坡的影响,在部分案例中可接受的位移水平已经作为边坡地震作用下稳定与否的判据。以下是一些案例用来为本项目安全性评估做参考^[2]。

(1)Hynes-Griffin 和 Franklin^[11]的研究结果表明,对于建造堤坝来说,高达 100 cm 的位移是可以接受的。

(2)Wieczoreketal 等^[12]采用 5 cm 作为加利福尼亚州 San Mateo 地区一滑坡灾害的允许最大位移。

(3)Keefer 和 Wilson^[13]将 10 cm 作为南加利福尼亚一完整的边坡的允许位移。

(4)Jibson 和 Keefer^[14]在密西西比河流域的滑坡,认为允许位移在 5~10 cm 区间是可接受的。

3 种分析方法中 Imperial Valley 地震波永久位移为 11 cm,QUAKE/W 地震波永久位移为 22 cm,唐山地震波为 53 cm,如果发生类似唐山地震的烈度,边坡不能够保持稳定,在另外两种地震波作用下,结合前述拟静力分析方法结果以及地震系数敏感性分析,可以认为该边坡在设防地震烈度下部分块体会发生小的位移,但边坡不会发生整体失稳。

4 总结

在国内 Newmark 方法应用研究较少,本文

首次应用 Newmark 分析方法对曹妃甸深槽典型断面进行动力稳定分析评价,计算的位移值大小可以定性的反映地震对场地边坡的影响,得到如下结论:

(1)Newmark 分析方法采用了 3 种加速度时程曲线:QUAKE/W、唐山地震波、Imperial Valley 地震波,对横切甸头深槽的 N—S 剖面进行分析计算,计算结果表明,海底斜坡在地震影响下分别产生 0.22、0.53 和 0.11 m 的永久位移。根据现有的基于 Newmark 分析方法的研究成果,如果发生类似唐山地震的烈度,边坡不能够保持稳定,在另外 2 种地震波作用下,可以认为该边坡在设防地震烈度下部分块体会发生小的位移,但边坡不会发生整体失稳。虽然输入地震波峰值加速度相同,但持续时间和地震波形会影响 Newmark 分析结果。在相同地震震级情况下,地震时间持续长、超越峰值频率高,地震力对海底斜坡破坏作用越大。

(2)边坡土体大致按照激励地震动的振动形式做着相应的受迫振动;地震作用下边坡最小安全系数会出现大于 1.0 的情况,虽然在某一时刻安全系数大于临界值,但不代表边坡在该时刻会发生破坏。

(3)滑坡的发生往往是其原生地质条件及外部多种因素共同作用的结果,采用 Newmark 分析方法对滑坡稳定性分析,其工作量小、易于完成,具有一定的通用性,对工程技术人员来说是一种较实用的分析方法。本项目的研究成果对类似边坡稳定性评价、近海工程建设等提供重要的参考作用。

参考文献:

- [1] Abramson L W, Lee T S, Sharma S, et al. Slope Stability and Stabilization Methods[M]. 2nd edition. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2001.
- [2] Anderson D G, Martin G R, Seismic analysis and design of retaining walls, buried structures, slopes, and embankments (NCHRP REPORT 611) [R]. Washington D C: Transportation research board, 2008.
- [3] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析方法、原理、程序[M]. 北京:水利水电出版社,2003.
- [4] 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.
- [5] Houston S L, Houston W N, Padilla J M. Microcomputer-

- aided evaluation of earthquake-induced permanent slope displacements[J]. *Microcomputers in Civil Engineering*, 1987, 2(3): 207-222. doi: 10.1111/j.1467-8667.1987.tb00147.x
- [6] 褚宏宪, 方中华, 史慧杰, 等. 海曹妃甸海底深槽斜坡稳定性分析与评价[J]. *海洋工程*, 2016, 34(3): 114-122.
- [7] 李承亮, 冯 春, 刘晓宇. 拟静力方法适用范围及地震力计算[J]. *济南大学学报: 自然科学版*, 2011, 25(4): 431-436.
- [8] 刘立平, 雷尊宇, 周富春. 地震边坡稳定分析方法综述[J]. *重庆交通大学学报*, 2001, 20(3): 83-88.
- [9] 徐光兴, 姚令侃, 李朝红, 等. 边坡地震动力响应规律及地震动参数影响研究[J]. *岩土工程学报*, 2008, 30(6): 918-923.
- [10] 方中华, 褚宏宪. 波浪作用下曹妃甸深槽斜坡稳定性分析[J]. *海洋地质前沿*, 2015, 31(11): 29-35.
- [11] Hynes-Griffin M E, Franklin A G. Rationalizing the seismic coefficient method[R]. *Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi*, 1984.
- [12] Wieczorek G F, Wilson R C, Harp E L. Map showing slope stability during earthquakes in San Mateo County, California[R]. *U. S. Geological Survey*, 1985.
- [13] Keefer D K, Wilson E L. Predicting earthquake-induced landslides, with emphasis on arid and semi-arid environments[C]// *Proceedings of Landslides in a Semiarid Environment on the Inland Valleys of Southern California*. Inland Geological Society, Riverside, CA (USA), 1989, 2: 118-149.
- [14] Jibson R W, Keefer D K. Analysis of the seismic origin of landslides; examples from the New Madrid seismic zone[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1993, 21(4): 521-536.

APPLICATION OF NEWMARK DISPLACEMENT ANALYSIS TO SEISMIC STABILITY EVALUATION OF SUBMARINE SLOPE

CHU Hongxian, FANG Zhonghua, SHI Huijie, LI Panfeng

(Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environmental Geology, Ministry of Land Resources, Qingdao 266071, China;
Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266061, China;
Qingdao Institute of Marine Geology, CGS, Qingdao 266071, China)

Abstract: Using the Newmark method for seismic time history analysis, we can put into account the effects of natural seismic peak ground acceleration (PGA), duration, and seismic frequency on seabed slopes, and different seismic waves can be input for simulation. In this paper, we calculated the dynamic response of a typical seabed slope as the Caofeidian to an earthquake similar to the Tangshan earthquake in scale. It is concluded that the value of displacement value can be used to quantitatively describe the influence of the earthquake on the slope. Therefore, the allowable displacement value of submarine slope and buildings on it can be used as a marker in security and stability analysis, which may provide important reference for slope stability evaluation and offshore construction.

Key words: earthquake; submarine slope; stability; Newmark; displacement