

粘质海底稳定性实例分析*

顾小芸

(中国科学院力学研究所 北京 100060)

摘 要 本文对南海珠江口盆地大陆架区和东海浙江沿岸象山港的粘质海底进行了稳定性分析。通过实例分析判定了该地区不稳定性的原因,并给出了稳定性估计的直观图。文中还指出了今后研究的方向。

关键词 海底边坡 边坡稳定性 海洋粘土 极限平衡 波浪作用

1 前 言

海底土体受波浪作用有可能在极缓的坡度(坡角有时小于 1°)下产生滑动。这种滑动会对海洋结构物产生很大破坏作用。重者会引起钢平台翻倒和沿斜坡下滑,美国密西西比三角洲B平台的事造成一亿多美元的损失就是一例^[1]。轻者会引起海底电缆和管道的断裂。因此,80年代以来海底土体稳定性研究已成为国际上相当活跃的一个研究领域。由于世界各地的地质情况千差万别,结合实测资料进行分析和搜集海底滑动的实例显得特别重要。

海底滑动的面积很广,通常采用区域性地球物理调查和力学分析相结合的方法进行研究。地球物理调查给出滑坡的几何形态;对环境应力的分析,尤其是波浪引起海底土中的应力分析是重要的一环;土工测试则提供土性参数。分析方法的使用得当与否,在很大程度上依赖于原位土的工程性质是否被正确地反映,因此计算方法的选择是和区域性调查的详细程度相匹配的。

我国近海工程发展得较晚,海底稳定性研究更是处于起始阶段。在已进行过区域性海洋工程地质调查的海域中,渤海湾的地势平坦,不易发生天然滑动,南海西部北部湾海底0.8 m以下分布的土层主要为陆相超固结硬粘土和砂砾层,也不可能发生海底滑动。南海东部珠江口盆地陆架区海底有一定坡度,且分布着软粘土,有可能失稳;东海的浙江东部近岸区曾观测到海底滑坡。黄河三角洲则在粉粒为主的海底曾观测到陡崖等不稳定因素。由于对不同土质的海底分析方法有所不同,本文就南海和东海两海区已搜集到的粘质海底实际资料进行海底稳定性分析。

* 收稿日期:1995-1-20

本文为国家自然科学基金资助课题的研究成果

2 珠江口盆地陆架区海底稳定性分析

在珠江口盆地陆架区的 1:20 万区域性海洋工程地质调查中,地球物理资料虽然暂时还没有揭示滑坡的迹象,但土工资料表明,在海底深度 100 m 以浅的陆架区存在非常软弱的浅层粘土。从其它国家曾发生海底滑动的实例中看到,这样软弱的粘土是值得注意的土层。因此作者对该土层进行了海底稳定性分析。

分析区域位于珠江口盆地卫滩北区的西北部,东经 $115^{\circ}0' \sim 115^{\circ}40'$,北纬 $21^{\circ}30' \sim 22^{\circ}0'$ 。水深在 70~100 m 范围。海底粘土为第四纪海相沉积物。粘土层厚度由北向南逐渐减小(图 1),最大厚度处为 14 m。该粘土层水平向分布的尺度超过 20 km。海底由西北向东南倾斜,但坡度平缓,最大坡角 $\alpha_{\max} = 0.05^{\circ}$ 。对于土层厚宽比小,坡度平缓的几何情况,无限坡分析方法最适宜。

研究区域内,50 年一遇的波浪要素如下:有效波高 $H = 13.7$ m,周期 $T = 13.9$ s,波长 $L = 301.4$ m。

对于波浪荷载,用得最多的是线性波理论。当海底假定为刚性时,海底波浪压力 p_b 的表达式为:

$$p_b = p_0 \sin(\lambda x - \omega t) \quad (1)$$

式中 p_0 为压力波幅,波数 $\lambda = 2\pi/L$, ω 为圆频率, t 为时间, r_w 为水的重度, d 为水深。

在假定土骨架为弹性、孔隙水可压缩、达西定律成立的条件下可计算波浪引起海底土层中的应力分布^[2],得到以下的剪应力幅值

$$\tau_w = p_0 \lambda Z e^{-\lambda Z} \quad (3)$$

和孔隙压力幅值

$$U = p_0 e^{-\lambda Z} \quad (4)$$

τ_w 和 U 随深度的无量纲分布如图 2 所示。由图看出,在海底土层深度为 0.15 倍波长处,剪应力达到极大值。

表 1 中列举了对于实际波浪情况和不同水深不同厚度土层中的剪应力和孔隙压力幅值。

根据本地区可能发生的地震构造所划分的潜在震源区,和由本地区地震烈度资料或强震记录得到的地震动参数衰减规律,所进行的地震危险性概率分析表明,50 年超越概率为 10% 的地震加速度 a 为 0.064 g。按地震工程的经验,通常将危险性分析结果加

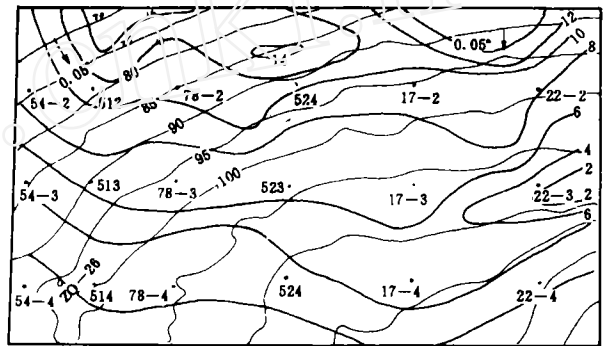


图 1 软粘土层等厚线图

Fig. 1 Map of isopacheths of the soft clay layer in the studied area

1. A₁ 层等厚线; 2. 海底等深线; 地形坡度角; 4. 钻孔位置; 5. 取样孔

20%，作为该区的保守值，即 $\alpha = 0.077 g$ 。

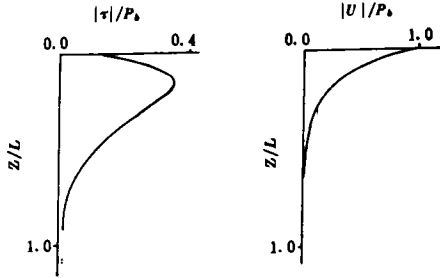


图2 剪应力和孔隙压力的无量纲分布图
Fig. 2 Dimensionless distribution of shear stress and pore pressure

表1 波浪引起的剪应力和孔隙压力幅值

Table 1 Shear stress and pore pressure caused by sea wave

水深 <i>d</i> /m	土层厚度 <i>Z</i> /m	剪应力 τ_w /kPa	孔隙压力 <i>U</i> /kPa	<i>U</i> / <i>Z</i> /kPa·m ⁻¹
70	14	6.78	23.2	1.66
	8	4.39	26.3	3.29
80	10	4.35	20.9	2.09
	9	3.63	21.3	2.73
90	6	2.84	22.7	3.78
	10	3.57	17.1	1.71
95	8	2.98	17.9	2.24
	6	2.33	18.6	3.10
95	10	3.23	15.5	1.55
	8	2.69	16.2	2.03
95	6	2.11	16.9	2.82
	5.5	1.95	17.0	3.09

在研究区域内，有一钻孔 ZQ₂ 和带孔隙压力测头的原位静力触探试验，其位置如图 1 所示。钻孔的土样揭示，该处软粘土层厚仅 5.5 m。至于广大区域内的土工资料，则来自各取样点的浅层柱状样。

根据钻孔原状土的室内土工试验、静力触探试验、以及地层沉积历史的综合分析，该土层属正常固结粘土。不排水强度的解释值如图 3 所示。粘土层底部 $S_u = 10$ kPa。由固结不排水三轴试验得到有效强度指标为 $c' = 0, \phi = 23.7^\circ$ 。为模拟波浪荷载的作用，进行了周期为 0.1 s 的动单剪试验。试验结果显示，周期荷载后静强度降低约 1/3 的规律。

浅层柱状样的最大长度只有 3 m，不能测到软粘土层底部的强度值。根据研究区域西北部粘土强度最低、土层最厚，并考虑到强度随深度线性增长的趋势和周期荷载后强度有所降低的因素，假定粘土层最厚处土层底部的不排水强度在受周期荷载作用后也为 10 kPa。

关于稳定性分析方法的选择，既要根据问题的几何形态，又要考虑计算参数的掌握程度。本例中用无限坡极限平衡法较适宜。

总应力分析中，土的抗剪强度为 S_u ，于是极限平衡条件为 $\tau = S_u$ 。表 1 中的 τ_w 值均小于 10 kPa，说明在波浪的单独作用下不能引起土体破坏。

当考虑地震力作用时，拟静态极限平衡条件为：

$$\frac{S_u}{r'Z} = \frac{1}{2} \sin 2\alpha + \alpha \frac{r}{r'} \cos^2 \alpha \tag{5}$$

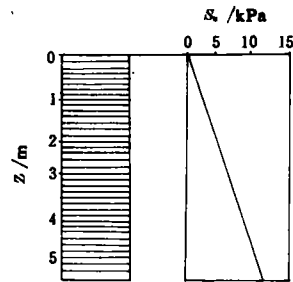


图3 不排水强度的解释值
Fig. 3 Interpreted value of undrained shear strength

对于坡度 α 很小 ($<1^\circ$) 的海底, 重力和地震力共同作用的情况可用更简单的形式表示:

$$\frac{\tau_s}{r'Z} = \sin\alpha + a \frac{r}{r'} \quad (6)$$

当 $\alpha \approx 0$ 时, 地震作用引起的剪应力 τ_s 可用极简单的形式表示:

$$\tau_s \approx arZ \quad (7)$$

表 2 为对不同土层厚度 Z 算得的 τ_s 值。表中数字说明, 在 50 年一遇的地震情况下有可能失稳。

有效应力分析中, 安全系数 F 的表达式如下:

$$F = \frac{c' + r'Z \cos^2\alpha \left(1 - \frac{r}{r'} a \tan\alpha - \frac{U}{r'Z \cos^2\alpha}\right) \tan\phi}{r'Z \sin\alpha \cos\alpha \left(1 + \frac{r}{r'} \frac{a}{\tan\alpha}\right)} \quad (8)$$

正常压密土的 $c' = 0$ 。在不考虑地震荷载时, 式(8)可简化为:

$$\frac{\tan\alpha}{\tan\phi} = 1 - \frac{U}{r'Z \cos^2\alpha} \quad (9)$$

孔隙水压力 U 产生的原因可能是高沉积速率、波浪引起的周期荷载、或者气体的存在^[3]。由于该粘土层如前所述为饱和的正常固结土, 高沉积速率和气体存在的因素都可排除, U 只能由波浪荷载引起。因此, 此处的 U 值就是式(4)中的 U 。

将 $c' = 0$ 和 $\phi = 23.7^\circ$ 代入式(9), 得到 $U/Z \approx 7$ kPa。表 1 中所有的 U/Z 值均小于该值。因此, 有效应力分析也表明, 在波浪单独作用下土体不能发生破坏。

在考虑地震荷载时, 极限平衡条件由式(8)得到:

$$\frac{\tan\alpha}{\tan\phi} = \frac{1 - \frac{r}{r'} a \tan\alpha - \frac{U}{r'Z \cos^2\alpha}}{1 + \frac{r}{r'} \frac{a}{\tan\alpha}} \quad (10)$$

当 $a = 0.077$ g 时, $U/Z = 3.98$ kPa。该值和表 1 中的有些 U/Z 值已比较接近。而表 1 的数字只是波浪引起的孔压部分。在地震作用下, 孔隙压力在短时间内不能消散掉, U 值应比表 1 的数字大。因此, 在 50 年一遇的波浪和 50 年一遇的地震共同作用下, 土体有可能出现滑动。

由此看到, 总应力法和有效应力法分析所得结果是一致的, 但是, 值得指出两点:

(1) 波浪和地震都处于 50 年一遇的情况是极为保守的。因此, 在实际情况下观察不到滑动迹象是自然的。在分析中采取了这种极端保守的观点, 是为了要引起工程人员的足够重视。此外, 能够推测, 由研究区域继续向西北方向达到珠江口三角洲时, 水深将逐渐减小, 软粘土层将逐渐增厚, 滑动的可能性则将增大。图 4 为波浪引起的剪应力 τ_w , 土层厚度 Z 和水深 d 之间的关系图。如果水深为 20 m, 对于 16 m 厚且不排水强度 $S_u = 15$ kPa 的土层, 海底滑动可能由波浪作用引起。因此, 虽然目前尚无珠江口三角洲的资料, 但可以

表 2 拟静态方法计算的地震力引起土中剪应力

Table 2 Shear stress in soil caused by seismic force calculated by using pseudostatic method

土层厚度 Z / m	剪应力 τ_s / kPa	
	$a = 0.064g$	$a = 0.077g$
6	6.64	7.97
8	8.86	10.63
10	11.07	13.28
14	15.49	18.53

预言,一旦三角洲区域需要开发时,应把土体滑动分析放在显著的地位。

(2)确定 F 值的关键是强度指标的选取,所以优质土样的获得和高质量的土工试验结果必须予以保证。这点尤其在取浅层柱状样及其试验时应加以注意。

3 浙江东部海域象山港的滑动实例分析

浙江东部海域象山港(东经 $122^{\circ}03'20''$ 北纬 $29^{\circ}46'50''$)海底滑动剖面由地球物理资料揭示(图5)。地质分析表明,滑动体的年代分属 Q_3 和 Q_4 。由于海底柱状样最大长度不超过 1.6 m,重力式取样器不能穿过 Q_4 层以采集未经滑动的 Q_3 土样,因此分析只能限

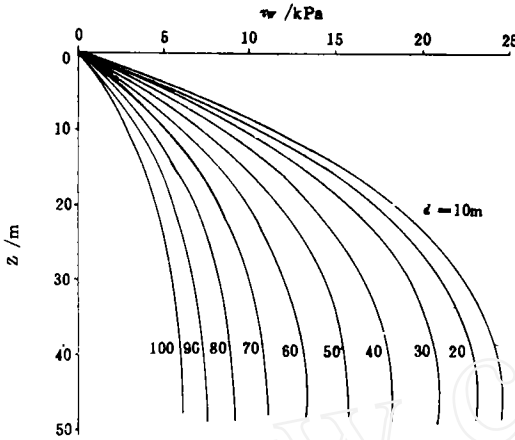


图4 剪应力-土层厚-水深关系图
Fig. 4 Relation between τ_w, Z and d

于对 Q_4 滑坡体进行。

海底坡度在 $4^{\circ} \sim 8^{\circ}$ 间变化,滑动土层的宽厚比约等于 10。

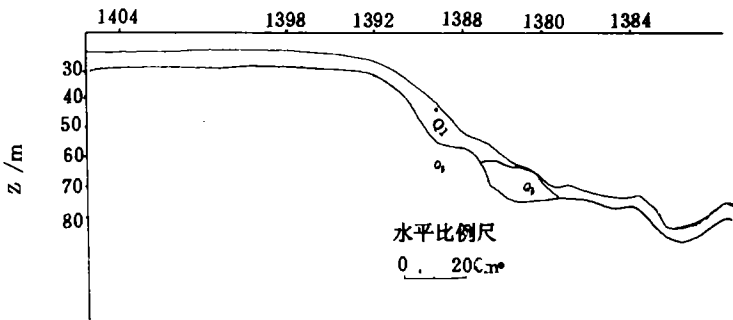


图5 象山港海底滑动剖面图
Fig. 5 Profile across the landslide in Xiangshan Bay

象山港为不可多得的天然军港,港内水深浪静。与滑坡区最近的松兰山水文站资料表明,最大波高为 2.3 m。象山港内的波浪应小于该值,故取 2 m 作为计算波高。又根据浙江省地震带及地震危险区略图,本区不在地震带内,地震影响可以不予考虑。

对柱状样进行的不排水强度 S_u 值非常离散,反映了土样的不均匀性和取样技术导致的扰动性。这表明土工资料极为粗糙。在这种情况下, S_u 值只得采用 4 和 6 kPa 两个数值。

由于土层宽厚比为 10,既能用无限坡近似分析,也能用圆弧滑动方法。

第一步,先进行无限坡分析。本区波浪很小,按线性波理论计算,当水深 $d = 55$ m 时,海底波浪压力幅值 $p_0 = 0.224$ kPa,这是一个极小的量。地震影响如前所述不必考虑。由此,可以从单一的重力作用进行初步估算。

极限平衡条件的表达式为:

$$\frac{S_u}{r'z} = \frac{1}{2} \sin 2\alpha \quad (11)$$

r' 变化很小,可令其为常数,即 $r' = 0.7 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。这样,式(11)由图 6 表示。当 $\alpha = 4 \sim 8^\circ$, $S_u = 4$ kPa 时, $z = 8 \sim 4$ m; 当 $S_u = 6$ kPa 时, $Z = 12 \sim 6$ m。这表明,在本区海底坡角的实际情况下,软弱粘土的厚度一旦超过 Z 值,单一的重力作用就能形成小块滑坡,也就是说, Q_4 沉积物不可能继续增厚。这和观测到的情况比较接近。但是,随着时间的推移,在水流作用下,这种小块滑体易被冲刷,因此观测到的机会不多。

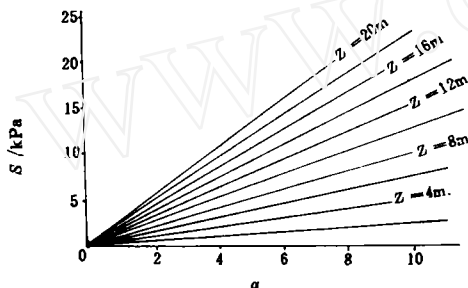


图 6 强度-土层厚-坡角关系图

Fig. 6 Relation between S_u , Z and α

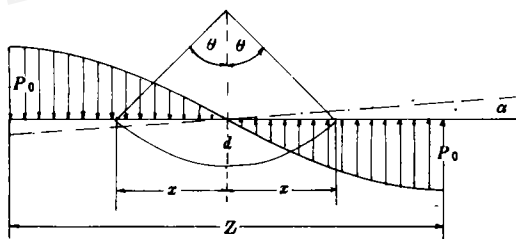


图 7 波浪作用下的圆弧滑动

Fig. 7 Arcuate sliding under wave action

第二步,再用考虑波浪压力的圆弧滑动方法^[4]进行计算。

对滑动面作圆弧,定出圆弧中心和滑动面弧角 2θ (图 7)。当滑动力矩和抵抗力矩相等时,达到极限平衡状态,即:

$$\frac{2}{3} x^3 \alpha r' + \frac{L^2 p_0}{2\pi^2} [A] = 2x^3 \frac{S_u}{Z} [B] \quad (12)$$

式中 x 为滑动面长度之半, $[A] = \sin\beta - \beta\cos\beta$, $\beta = \frac{2\pi x}{L}$, $[B] = \frac{\sin\theta - \theta\cos\theta}{\sin^3\theta}$ 。

当 $S_u = 4$ kPa 时, $z = 5.7$ m; 当 $S_u = 6$ kPa 时, $z = 8.6$ m。

两种不同方法得到的结果比较接近,说明本区波浪太小,确实可以忽略不计。滑坡主要为重力作用所致。

4 结 论

(1) 本文对两个软粘土海底的不同海区进行了实例分析。分析表明,波高具有显著影响。当波高达到 13.7 m 时,即使海底平缓,坡度 $\alpha < 1^\circ$,也可能失稳。虽然在所研究区域内未观测到滑坡现象,但通过文中给出的南海东部海域波浪引起的剪应力、土层厚度和水深

间的关系图,可方便地估计不稳定性的条件,并从而推测,在水深减小和软粘土层厚度增大的珠江三角洲地带,有可能出现滑坡。

(2)象山港中波浪很小,波浪压力的作用甚微,重力起着主要作用。沉积作用造就的地形为产生滑坡的原因,而冲刷作用则使滑块数量减小。重力作用下的稳定性估计可由 $S_u-Z-\alpha$ 关系图方便地得到。

(3)本文采用较简单的极限平衡分析方法,是和当前区域性调查中土性参数较为粗糙的实际情况相适应的。若要采用较为复杂的变形分析方法,首先应提高海底取土技术水平和土性参数确定方向的精确度。

4)为推进我国海底稳定性研究工作,除提高海洋土性研究的水平外,应加强对实际资料的搜集,尤其注意波高较大的区域和软粘土厚度大于 0.1 波长的三角洲区域。

致谢 作者向提供资助的国家自然科学基金委员会和提供地质资料的地质矿产部第二海洋地质大队及国家海洋局第二研究所表示深切的谢意。

参 考 文 献

- [1] Bea R. G. 1971. How seafloor slides Affect offshore structures. *Oil and Gas Journal*. 29, 88~92.
- [2] 章根德,顾小芸. 1989. 波浪引起的海底土层中的应力场和位移场力学与实践. 12;6,29~33.
- [3] 顾小芸. 1989. 海底边坡稳定分析方法综述. *力学进展*, 19(1), 50~58.
- [4] Henkel D. I. 1970. The Role of Waves in Causing Submarine Landslides. *Geotechnique*, 20(1), 75~80.

CASE STUDY OF CLAYEY SEABOTTOM STABILITY

Gu Xiaoyun

(*Institute of Mechanics, Academia sinica, Beijing 100080*)

Abstract

In this paper the stability of clayey seabottom in the continental shelf area of South China Sea in the Pearl River Mouth and in the Xiangshan Bay of the East Sea are analyzed. The causes of the instabilities are revealed. Diagrams for estimation of the stability are given. Finally, the direction of further investigation is pointed out.

Key words Submarine slope, Slope stability, Marine clay, Limit equilibrium, Wave action.