

海底土体稳定性实例分析

顾小芸 (中国科学院力学研究所)

摘要 本文对南海东部珠江口盆地陆架区和东海浙东象山港地区的海底滑坡进行了实例分析,并指出了今后的研究方向。

一、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,轻者会引起海底电缆和管道的断裂。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,尤其是波浪引起的海底土中的应力分析是很重要的一环;土工测试则提供土性参数。分析方法的使用得当与否,往往和区域性调查的详细程度相匹配。

我国近海工程发展得较晚,在已进行过区域性海洋工程地质调查的海域中,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。本文就该两海区的实际资料进行海底稳定性分析。

二、珠江口盆地陆架区海底稳定性分析

珠江口盆地海底深度100m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 $115^\circ 0'$ — $115^\circ 40'$,北纬 $21^\circ 30'$ — $22^\circ 0'$ 。水深70—100m范围。海底软粘土层厚度由北向南逐渐减小(见图1),最大厚度处为14m。水平向分布的尺度超过20km。海底坡度平缓,最大坡角 $\alpha_{\max}=0.05^\circ$ 。对于土层厚度较小,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 $H=13.7\text{m}$,周期 $T=13.9\text{s}$,波长 $L=301.4\text{m}$,地震加速度的保守值为 $0.077g^{[1]}$ 。

对于波浪荷载,用得最多的是线性波理论,其压力波幅 P_0 为:

$$p_0 = \gamma_w H / 2\lambda d \cosh \quad (1)$$

式中 γ_w ——水的重度; H ——波高; $\lambda=2\pi/L$, 为波数; L ——波长; d ——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,得到剪应力幅值和孔隙压力幅值分别由式(2)、(3)表示:

$$\tau_w = p_0 \lambda z e^{-\lambda z} \quad (2)$$

$$u = P_0 e^{-\lambda z} \quad (3)$$

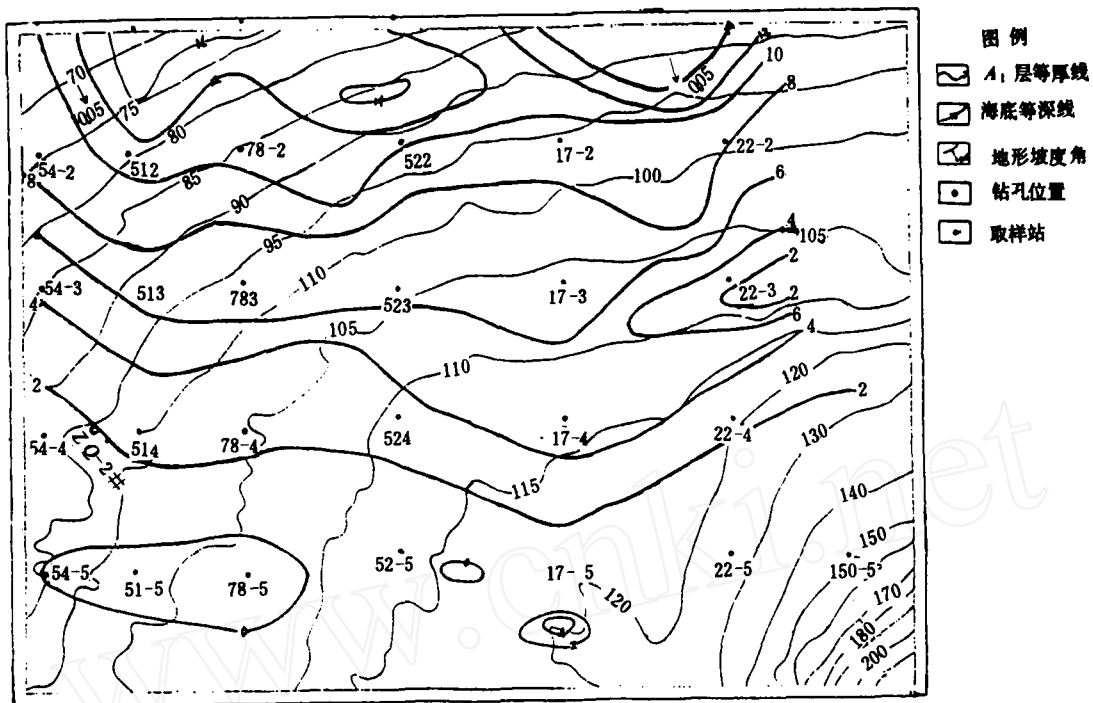


图1 软粘土层厚度分布图

式(2)表明,在海底土层的0.15倍波长深度,也就是说,土层深度约40m处,剪应力达到极大值(见图2)。本区软粘土层的最大厚度只有14m,在此范围内剪应力值随深度而增大。

研究区域内的唯一钻孔揭示,该处软粘土层厚5.5m。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结果,该土层属于正常固结粘土。不排水强度值示于图3,在粘土层底部 $S_u=10\text{kPa}$ 。由固结不排水三轴试验得到有效强度指标为 $c'=0$, $\phi=23.7^\circ$ 。周期为0.1秒的动单剪试验结果表明,该软粘土在周期荷载作用后,强度并不降低。但对较深粘土层进行的大量动单剪试验,显示了周期荷载后静强度降低约1/3的规律。因此,从保守角度着眼,认为该软粘土在周期荷载作用后强度也有所降低。钻孔以外广大区域内的土工资料,则来自浅层柱状样,其最大长度只有3m,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10kPa。

由于土性参数比较粗糙,故采用无限坡极限平衡法。

总应力分析中,土的抗剪强度为 S_u ,于是极限平衡条件为 $\tau=S_u$ 。本区内按式(2)计算的 τ_w 值均小于10kPa,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:

$$S_u/\gamma'z = \sin 2\alpha/2 + a_h \gamma \cos^2 \alpha/\gamma' \quad (4)$$

当 $\alpha \approx 0$ 时, τ_s 可用极简单的形式表示:

$$\tau_s \approx a_h \gamma z \quad (5)$$

本区内按式(5)算得的 τ_s 值说明,在50年一遇的地震情况下有可能失稳。

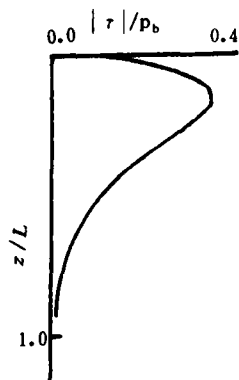


图2 波浪引起的剪应力分布

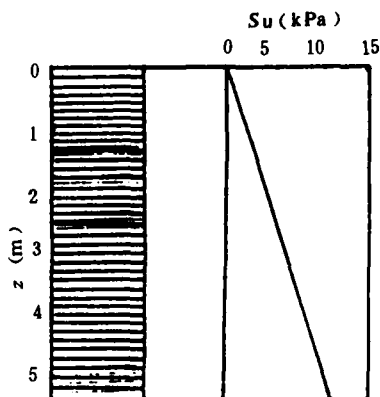


图3 不排水强度沿深度分布

有效应力分析中,安全系数 F 的表达式如下:

$$F = \frac{C' + \gamma' z \cos^2 \alpha \left(1 - \frac{\gamma}{\gamma'} a_h \tan \alpha - \frac{u}{\gamma' z \cos^2 \alpha} \right) \tan \phi}{\gamma' z \sin \alpha \cos \alpha \left(1 + \frac{\gamma}{\gamma'} \frac{a_h}{\tan \alpha} \right)} \quad (6)$$

正常压密土的 $c' = 0$ 。在不考虑地震荷载时,式(6)可简化为:

$$\tan \alpha / \tan \phi = 1 - u / \gamma' z \cos^2 \alpha \quad (7)$$

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,或气体的存在。由于该粘土层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(3)中的 u 。

将 $c' = 0$ 和 $\phi = 23.7^\circ$ 代入式(7),得到 $u/z \approx 7 \text{ kPa}$ 。本区计算的所有 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(6)得到:

$$\frac{\tan \alpha}{\tan \phi} = \frac{1 - \frac{\gamma}{\gamma'} a_h \tan \alpha - \frac{u}{\gamma' z \cos^2 \alpha}}{1 + \frac{\gamma}{\gamma'} \frac{a_h}{\tan \alpha}} \quad (8)$$

当 $a_h = 0.077g$ 时, $u/z = 3.98 \text{ kPa}$ 。该值和本区中有些由波浪引起的 u/z 值已比较接近。在地震作用下,孔隙压力在短时间内不能消散掉, u 值还应增大。因此在五十年一遇的波浪和五十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波浪和地震都处于五十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,也能推测,由研究区域继续向西北方向达到珠江口三角洲时,软粘土层将逐渐增厚,以致达到 40m 左右时,有可能出现滑动。目前尚无珠江口三角洲的资料,但可以预言,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位置。②确保 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保证。这点尤其在取浅层柱状样及其试验时应加以注意。

三、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°03'20" 北纬 29°46'50")海底滑动剖面由地球物理资料揭示如图 4。地质分析表明,滑动体 I 属 Q_3 , I 属 Q_4 。由于海底柱状样最大长度不超过 1.6m, 平均长度还不到 1m, 因此分析只能限于对 Q_4 滑坡体进行。

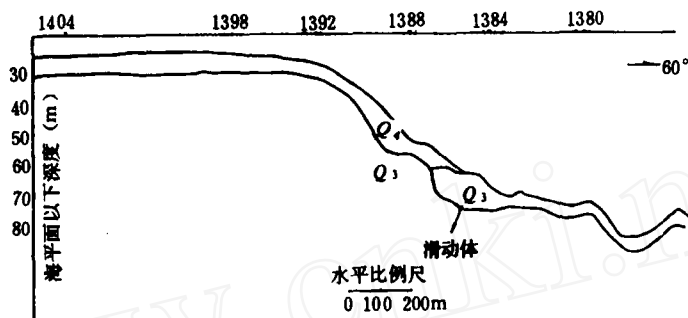


图 4 象山港海底滑动剖面

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。

象山港为不可多得的天然军港, 港内水深浪静。与滑坡区最近的松竺山水文站资料表明, 最大波高为 2.3m。象山港内的波浪应小于该值, 故取 2m 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, 可能是土样不均匀和扰动性所致。这表明土工资料极为粗糙。这种情况下, S_u 值只能采用 4 和 6kPa 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。

无限坡分析中, 海底波浪压力幅值 $P_0 = 0.224\text{kPa}$, 这是一个很小的量。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:

$$s_u / \gamma' z = \sin 2\alpha / 2 \quad (9)$$

γ' 变化很小, 可令其为常数, 即 $\gamma' = 0.7\text{Mg}/\text{m}^3$ 。这样, 式 (9) 由图 5 表示。当 $\alpha = 4^\circ \sim 8^\circ$, $S_u = 4\text{kPa}$ 时, $z = 8 \sim 4\text{m}$; 当 $S_u = 6\text{kPa}$ 时, $z = 12 \sim 6\text{m}$ 。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。

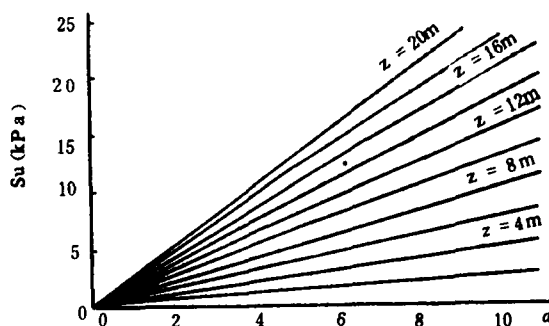


图 5 重力作用下的极限平衡条件

在考虑波浪压力的圆弧滑动方法^[2]中, 先定出圆弧中心滑动面弧角 2θ 。当滑动力矩和

抵抗力矩相等时, 达到极限平衡状态, 即:

$$2X^3\alpha\gamma'/3+L^2P_0 [A] /2\pi^2=2X^3S_u [B] /z \quad (10)$$

其中 $[A] = \sin\beta - \beta\cos\beta$, $[B] = (\sin\theta - \theta\cos\theta) / \sin^3\theta$

当 $s_u = 4\text{kPa}$ 时, $z = 5.7\text{m}$; 当 $S_u = 6\text{kPa}$ 时, $z = 8.6\text{m}$ 。

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。

四、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。实例分析表明, 对 $\alpha < 1^\circ$ 的平缓海底, 波高的影响极为显著。

2. 本文采用较简单的极限平衡方法, 是和当前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法的精确度。

3. 为推进我国海底稳定性研究工作, 应提高海洋土性研究的水平, 并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。

本文的地质资料是由地矿部第二海洋地质大队和国家海洋局第二研究所提供的, 特此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 顾小芸等, 珠江口盆地卫滩北区海底土体稳定性研究总报告, 1989, 内部报告。
- [2] Henkel D. I., The Role of Waves in Causing Submarine Landslides, Geotechnique, 1970, V. 20, No. 1