

混凝土平台地基沉降的分析计算

舒 芝 琴

提 要

本文结合某海区的地质资料和地基土的物理力学性质,采用国内外常用的方法对混凝土平台地基的沉降进行了分析计算。

一、前 言

混凝土平台地基的沉降与其它地基沉降一样,一般按地基变形分为三部分,即初始沉降、固结和次固结所引起的沉降。然而,由于平台还承受着海洋环境荷载(波浪力、风力和流力)的影响,所以对最大水平力引起的沉降和最大力矩造成的地基倾斜也应进行验算。

本文作为一个工程实例,为混凝土平台地基沉降的分析计算提供参考。

二、荷载选定原则

荷载包括平台的自重、设备荷重等。根据平台结构,用电子计算机算出基底承受的所有荷重,同样,对环境荷载,也可算出各种组合数据。

对固结沉降和次固结沉降,通常考虑用最大的竖向静荷载(以 Q_1 表示)来算,在计算初始沉降时,因为初始沉降是在加荷初期(理论上的瞬间)完成的,因此最大荷载的作用尽管

表 1 荷载组合表(kN)

Table 1 Loading combination (kN)

最大竖向静荷载 Q_1 (kN)		356106.6	(1)
十年一遇竖向波浪力 F_2	乘荷载系数 1.3	65543.7	(2)
	不乘荷载系数 1.3	50418.2	(3)
初 始 沉 降	组合一	356106.6	(1)
	组合二	421650.3	(1) + (2)
	组合三	406524.8	(1) + (3)
固 结 沉 降		356106.6	(1)
次 固 结 沉 降		356106.6	(1)

134180

不是同时作用上去的,但在估算中仍考虑为一次全部施加于平台基础上,同时还要考虑十年一遇的风暴情况下的竖向波浪力(以 F_2 表示)的影响,以及波浪荷载造成的地基土弹性模量和剪切模量的降低等组合因素进行计算。这三部分沉降所用的计算荷载列于表1。

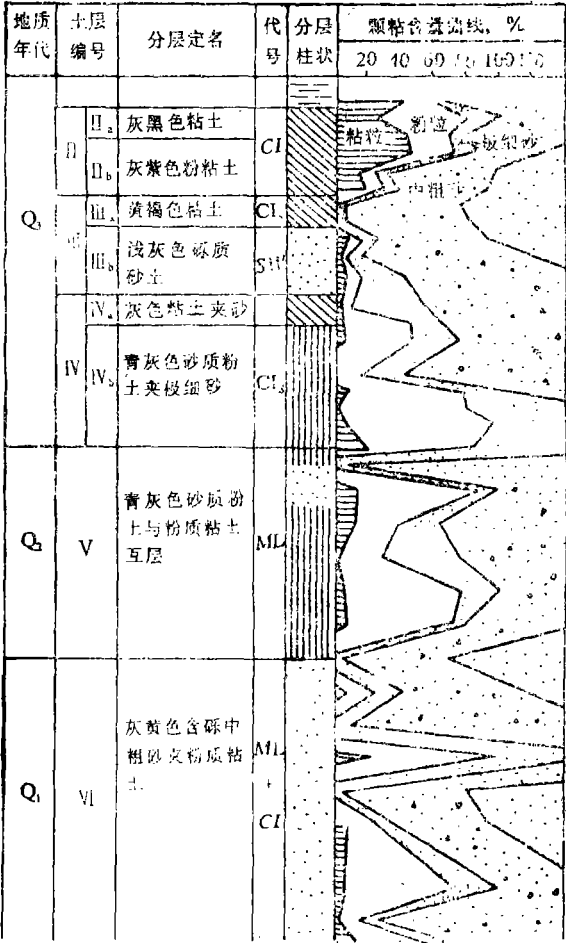


图1 中心孔地质柱状图

Fig. 1 Geologic columnar section of central hole

三、平台地基的土层及其物理力学指标

平台地基海区内分设5个钻孔,中心孔的地质分层如图1所示。在压缩层影响深度范围(57m)内,共分6个土层,其中,第I层厚度为0.8m的淤泥层,因在施工时要进行处理,故不计沉降,其它各层土的物理力学指标列于表2,表中指标是根据5个钻孔的现场试验资料统计得出的。

表 2 各土层物理力学性质汇总表

Table 2 Physical and mechanical properties for all layers of soil

层次	深度范围 (m)	层厚 (m)	土 性	容重 γ (g/cm ³)	比 重 G_s	孔隙比 e_0	压缩系数 a (10 ⁻⁵ Pa)	压缩模量 E_s (10 ⁵ Pa)	压缩指数 C_c	回弹指数 C_e	超压密比 OCR	固结系数 $C_\alpha \times 10^{-3}$ (cm ² /s)	弹性模量 E_i (10 ⁵ Pa)	泊松比 μ
II	0.8—3.5	2.7	粉质粘土	1.84	2.71	0.815	0.024	54	0.208	0.021	4.4	3.18	30	0.4
				-1.95	-2.73	-0.961	-0.035	-82	-0.218	-0.028		-5.31		-0.5
III	3.5—9.0	5.5	3.5—5.0m粉质粘土与砂质粉土	1.94	2.68	0.633	0.009	139	0.096	0.006	6.3	27.42	467	0.2
				-2.0	-2.72	-0.946	-0.01	-201	-0.12	-0.008		-30.44		-0.3
			5—9m砾质砂土	1.88	2.65	0.46								
				-2.05	-2.66	-0.78								
IV	9.0—20	11.0	砂质粉土夹粉质粘土	1.85	2.66	0.646	0.016	114	0.09	0.008	4.9	17.8	988	0.25
				-2.0	-2.69	-0.87	-0.022	-118	-0.143	-0.019		-25.9		-0.35
V	20—33	13.0	砂质粉土与粉质粘土互层	1.88	2.66	0.64	0.015	116	0.09	0.009	2.4	1.88	1487	0.30
				-1.96	-2.90	-0.84	-0.023	-132	-0.13	-0.013		-26.6		-0.40
VI	33—57	24.0	含砾中粗砂夹粉质粘土层	1.85	2.67		0.013	127	0.10	0.01	1.0	17.57	1321	0.25
				-2.18	-2.81		-0.026	-152				-25.79		-0.35

四、初始沉降、固结沉降和次固结沉降的计算

(一) 初始沉降

初始沉降 S_d 的计算用两种方法进行:

1. 用弹性半空间竖向位移解

$$S_d = C_d q B \frac{1 - \mu^2}{E}$$

2. 用美国 API 建议的方法

$$S_d = \frac{1 - \mu}{4GR} Q$$

式中 Q 、 q ——分别为作用于基础底面的竖向总荷载和单位面积压力;

B 、 R ——分别为基础宽度和等面积圆的半径 ($B = 5.934\text{cm}$ $R = 3348\text{cm}$);

μ 、 E 、 G ——分别为地基土的泊松比、弹性模量和剪切模量;

C_d ——基础中心点处的沉降计算系数 ($C_d = 1.12$)。

本文中各土层的弹性模量 E 值是根据挪威的 $DnV^{[1]}$ 规范推荐的经验公式确定的, 对 II—V 层 (超固结状态), 取 $E = 6.0q_c$, 对 VI 层 (正常固结状态), 取 $E = 4.5q_c$, q_c 为原位静力触探 (CPT) 的锥头阻力。泊松比值 μ 是根据各土层的土性查阅有关资料并参考经验值选

表 3 初始沉降计算结果

Table 3 Calculation results initial settlement

公 式		API 公式			弹性理论公式		
		$S_d = \frac{1 - \mu}{4GR} Q$			$S_d = C_d q B \frac{1 - \mu^2}{E}$		
条 件		Q (kN)	G (10^5Pa)	S_d (cm)	q (10^5Pa)	E (10^5Pa)	S_d (cm)
$\mu = 0.257$	不考虑模量折减						
	组合一	356106.6	403.14	4.90	1.01	1013.5	6.19
	组合二	421650.3	403.14	5.80	1.20	1013.5	7.33
	组合三	406524.8	403.14	5.59	1.15	1013.5	7.07
	考虑模量折减						
	组合一	356106.6	282.20	7.00	1.01	709.15	8.85
$\mu = 0.36$	组合二	421650.3	282.20	8.29	1.20	709.15	10.47
	组合三	406524.8	282.20	7.99	1.15	709.15	10.10
	不考虑模量折减						
	组合一	356106.6	372.61	4.57	1.01	1013.5	5.77
	组合二	421650.3	372.61	5.41	1.20	1013.5	6.83
	组合三	406524.8	372.61	5.21	1.15	1013.5	6.59
	考虑模量折减						
	组合一	356106.6	260.83	6.52	1.01	709.45	8.24
	组合二	421650.3	260.83	7.73	1.20	709.45	9.76
	组合三	406524.8	260.83	7.45	1.15	709.45	9.41

取的。由 E 、 μ 值即可算出相应的剪切模量 G 值 ($G = \frac{E}{2(1+\mu)}$)。考虑到波浪荷载造成 E 、 μ 值的降低, 对 E 、 μ 值各乘一个折减系数 0.7。计算结果列于表 3。

从表 3 看出, 计算初始沉降的两种方法中弹性理论法计算的结果偏大 (两者相差 2cm 左右), 尤其当 $\mu = 0.257$, 且考虑模量折减组合二时, 其沉降量最大 (10.47cm)。

(二) 固结沉降

固结沉降 S_c 的计算采用前期固结压力的分层总和法, 这种方法考虑了地基土受压历史对沉降计算方法的影响。

1. 对正常固结压力的分层总和法 (当 $P_0 = P_c$ 时)

$$S_c = \sum_{i=1}^n \frac{H_i}{1+e_0} C_c \lg \frac{P_0 + \Delta P}{P_0}$$

2. 对超固结土的分层总和法 (当 $P_c > P_0$ 时)

(1) 当附加应力 $\Delta P > (P_c - P_0)$ 时, 其沉降计算公式为

$$S_c = \sum_{i=1}^n \left(\Delta e' + \Delta e'' \right) \frac{H_i}{H e_0}$$

式中

$$\Delta e' = C_c \lg \frac{P_c}{P_0}, \quad \Delta e'' = C_c \lg \frac{P_0 + \Delta P}{P_0}$$

(2) 当附加应力 $\Delta P < (P_c - P_0)$ 时, 其沉降计算公式为

$$S_c = \sum_{i=1}^n C_c \lg \left(\frac{P_0 + \Delta P}{P_0} \right) \frac{H_i}{1+e_0}$$

式中

e_0 ——地基土天然状态的孔隙比;

P_0 ——地基土的自重应力;

ΔP ——基底处的附加应力;

C_c 、 C_e ——分别为地基土的压缩指数和回弹指数;

H_i ——地基土各层的厚度。

计算结果见表 4、表 5 和图 2。

表 4 各界面处的附加应力计算表

Table 4 Calculating table for additional stresses of interfaces

层次	层厚 (m)	层底深度 (m)	层底自重应力 P_0 (kPa)	各界面处的附加应力		$\Delta P = 4K_c \Delta P_0$ (kPa)
				Z/b	K_c	
						$\Delta P_0 = \frac{Q}{F} = \frac{356106.6}{3521.36} = 101.1$
II	2.7	3.5	25.1	0.118	0.249	100.7
III	5.5	9.0	80.7	0.303	0.244	98.7
IV	11.0	20.0	181.9	0.674	0.215	86.9
V	13.0	33.0	301.5	1.112	0.162	65.5
VI	24.0	57.0	531.9	1.921	0.089	压缩层 $36.0 < \frac{1}{10} P_0$

表 5 固结沉降计算结果

Table 5 Calculation results of consolidation settlement

层次	孔隙比 e_0	土层厚度 H_i (cm)	各层中心深度 h_i (cm)	平均自重应力 P_{0i} (kPa)	平均附加应力 ΔP_i (kPa)
II	0.89	270	215	12.6	100.9
III	0.70	550	625	52.9	99.7
IV	0.76	1100	1450	131.3	92.8
V	0.71	1300	2650	241.7	76.2
VI	0.82	2400	4500	416.7	50.8

层次	超固结比 OCR	先期固结压力 P_{0i} (kPa)	$P_{0i}-P_{0i}$ (kPa)	压缩指数 C_c	回弹指数 C_s	固结沉降量 S_c (cm)
II	4.4	55.4	42.8	0.218	0.025	12.00
III	6.3	333.0	280	0.110	0.007	1.34
IV	4.9	643.0	512	0.115	0.014	2.03
V	2.4	580.0	338	0.100	0.011	0.98
VI	1.0	417.0	0	0.100	0.010	6.59

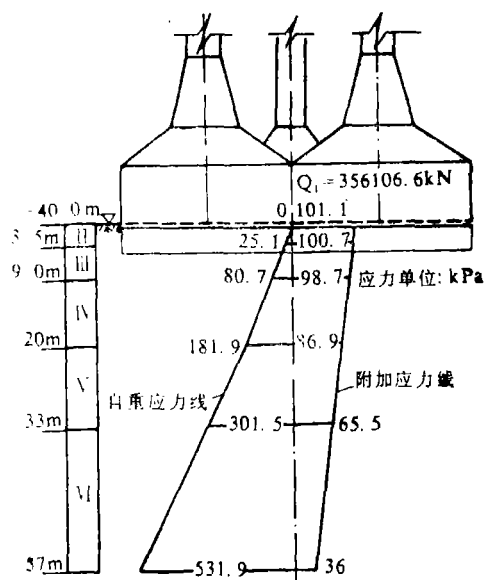


图 2 基础下应力曲线图

Fig.2 Stress curve under foundation

(三) 次固结沉降

次固结沉降的计算公式为

$$S_s = \sum_{i=1}^n C_{\alpha i} \lg \frac{t_x}{t_c} H_i$$

式中 $C_{\alpha i}$ ——次固结系数，由固结试验中的应变值（ ε ）与时间对数值（ $\lg t$ ）关系曲线的直线段的斜率确定；
 t_s ——需要计算次固结的时间；
 t_c ——主固结完成的时间（ $t_c = \frac{T_v H^2}{C_v}$ ）；
 T_v ——时间因素，可查表；
 H_i ——最大排水距离；
 C_v ——固结系数。
计算结果见表 6。

表 6 主固结完成时间和次固结沉降的计算结果
Table 6 Primary consolidation time and calculation result
of secondary consolidation settlement

层 次	土 层 厚 度 h_i (m)	最 大 排 水 距 离 H_i (cm)	固 结 系 数 $C_v \times 10^{-3}$ (cm ² /s)	主固结时间完成 t_c (d)		次固结系数 $C_{\alpha i}$	次固结沉降 S_s (cm) 取 $U=99.9\%$ 的 t_s		
				$U_t=99\%$	$U_t=99.9\%$		2y	5y	10y
II	2.7	270	3.18	472	719	0.002	0.10	0.32	0.18
III	5.5	550	27.09	230	350	0.001	0.28	0.49	0.66
IV	11.0	275	17.80	88	133	0.0011	0.90	1.38	1.74
V	13.0	217	17.17	57	86	0.0012	1.45	2.07	2.54
VI	24.0	300	17.57	106	161	0.0008	1.26	2.03	2.60

将以上三部分的计算结果汇总得到平台最终的沉降量，见表 7。

表 7 最终沉降计算结果 (cm)
Table 7 Calculation results of ultimate settlement (cm)

平台完工后时间	2y	5y	10y
初始沉降	10.47	10.47	10.47
固结沉降	22.64	22.64	22.64
次固结沉降	3.99	6.29	8.02
总沉降量	37.10	39.40	41.13

五、水平力引起的竖向沉降和弯矩
造成地基倾斜率的验算

将波浪力、风力、流力造成的水平力作为静力作用在基底上，来验算这一集中水平力所产生的沉降。由于水平力引起的沉降量一般较小，所以取最不利情况，即百年一遇的风暴所

产生的最大水平力(以 T_{max} 表示), 并乘以荷载系数 1.3 进行计算。如果在这种情况下水平力所引起的沉降不大的话, 那么其它情况的沉降就更小, 更安全了。

(一) 水平力引起的竖向沉降

根据净露蒂课题的解, 在土表面上作用一水平集中力时, 基底中心处的沉降为

$$S_{zt} = \frac{F_x(1-2\mu)x_t}{4\pi GR^2}$$

式中 F_x ——水平集中力;
 x_t ——该集中力距 x 轴的距离;
 μ ——土体泊松比;
 G ——土体剪切模量;
 R ——该集中力到基底中心的距离。

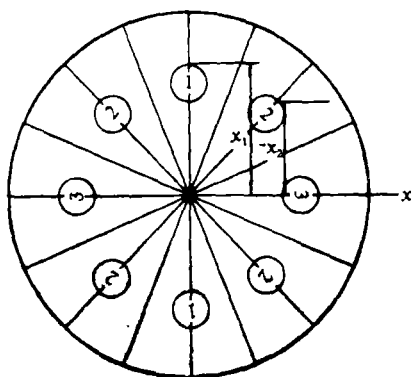


图 3

Fig. 3

假设水平集中力均布于基础等值圆面积的底部, 然后将圆面积分为 8 块扇形, 见图 3, 每块扇形上的水平集中力为 $1/8 T_{max}$, 各扇形形心相对于 x 轴的距离, 分成三种类型:

第一种, 上下 2 扇形 $x_1 = 0.65R$;

第二种, 对角 4 扇形 $x_2 = 0.65 R \cos 45^\circ$
 $= 0.707 x_1$;

第三种, 左右 2 扇形 $x_3 = 0$ 。

对应于最大水平力组合的垂直荷载下的各界面处的附加应力计算见表 8。

表 8 对应 T_{max} 的垂直荷载下各界面的附加应力计算

Table 8 Additional stress of interfaces corresponding vertical load T_{max}

层次	层底深度 (m)	层厚 (m)	各界面的附加应力(kPa)			平均附加应力 (kPa)
			z/b	K_0	$\Delta P_0 = \frac{Q}{A} = \frac{355581.2}{3355.88} = 106$	
II	3.5	2.7	0.121	0.249	106.0	105.8
III	9.0	5.5	0.311	0.244	105.6	104.6
IV	20.0	11.0	0.692	0.213	90.3	96.9
V	33.0	13.0	1.139	0.159	67.4	78.9
VI	57.0	24.0	1.967	0.087	36.9	52.2

竖向沉降的具体计算如下:

$$\sum_{i=1}^5 \Delta F_i = \sum_{i=1}^5 \bar{P}_i H_i = 10.58 \times 2.7 + 10.46 \times 5.5 + 9.69 \times 11 + 7.89 \times 13 + 5.22 \times 24$$

$$= 420.45$$

$$\sum_{i=1}^5 \frac{\Delta F_i}{G_i} = \frac{28.57}{107} + \frac{57.53}{1947.1} + \frac{106.59}{3872.4} + \frac{102.57}{5720.2} + \frac{125.28}{5285.3} = 0.367$$

$$G = \frac{\sum_{i=1}^5 \Delta F_i}{\sum_{i=1}^5 \frac{\Delta F_i}{G_i}} = \frac{420.45}{0.367} = 1145.64$$

$$\sum_{i=1}^5 \frac{\Delta F_i}{\mu_i} = \frac{28.57}{0.4} + \frac{57.53}{0.2} + \frac{106.59}{0.25} + \frac{102.57}{0.35} + \frac{125.28}{0.25} = 1628.11$$

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^5 \Delta F_i}{\sum_{i=1}^5 \frac{\Delta F_i}{\mu_i}} = \frac{420.45}{1628.11} = 0.258$$

于是

$$S_{s1} = \frac{F_s(1-2\mu)0.65R}{4\pi G\left(0.65 - \frac{R}{2}\right)^2} = \frac{\frac{1}{8} \cdot 16062(1-2 \times 0.258)0.65 \times \frac{67}{2}}{4\pi \times 1145.64(0.65 \times \frac{67}{2})^2}$$

$$= 0.314 \text{ (cm)}$$

$$S_{s2} = 0.707 S_{s1} = 0.222 \text{ (cm)}$$

$$S_s = 2S_{s1} + 4S_{s2} = 1.52 \text{ (cm)}$$

由此可见, 水平力引起的竖向沉降量, 即使在最不利的情况下其数值也是较小的。

(二) 地基倾斜率的验算

倾斜率采用美国 API 规范^[2]推荐的摇摆公式进行验算

$$\theta_r = \frac{3(1-\mu)}{8GR^3} M$$

式中 μ ——土体的泊松比;

G ——土体的剪切模量;

R ——等值圆形基础的半径;

M ——倾斜力矩 ($M = 5.624 \text{ kN} \cdot \text{m}$)。

地基倾斜率的验算是考虑裙板内被圈闭的土体随着平台结构一起倾斜, 所以公式中土体

表 9 倾斜率计算结果

Table 9 Calculation results of tilt rate

E (kPa)		G (kPa)	θ_r
$E=12000$	弹性模量 不考虑折减 12000	4615	0.00085
	考虑折减 8400	3231	0.0012
	压缩模量 不考虑折减 8080	3108	0.0013
	$E=8080$ 考虑折减 5740	2175	0.0018

的各参数取裙板插入深度 4.5 m 以下的值, 为了安全起见, 取 4.5 m 以下最小的值和考虑波浪荷载引起地基模量的降低再乘上 0.7 的折减系数, 计算结果见表 9。

六、结 语

1. 在混凝土平台地基的沉降计算中, 除了考虑用最大的竖向静荷载来计算外, 还应考虑海洋环境荷载的作用, 以及由于波浪荷载造成地基土的力学参数的降低, 作为最不利情况下的结果。

2. 在本平台地基沉降计算结果中, 固结沉降量占的比例最大, 初始沉降量次之, 次固结的沉降速率随着时间的推移而逐渐减小。

3. 本平台的裙板贯入深度为 4.5 m, 在裙板中的第 II 层土 (粉质粘土) 的压缩性较大, 因此裙板会随着土的压缩而同时下沉, 故在计算中圈在裙板内的土不作为基础的一部分较为合理; 其次, 由于裙板随土的压缩同时下沉, 从而使裙板的贯入深度随之增大, 起着有利的作用。

4. 在地基土中某些土层虽有砂性土, 但不是纯粹的砂粒, 而是混杂或掺夹在粉粘土中, 所以不单独作砂性土来估算沉降, 这样考虑是偏于安全的。再则, 迄今为止, 也尚未确认哪一个计算砂层土沉降的方法最为合理。

在计算过程中, 得到马时冬、沈理同志的大力协助, 特此致谢。

参 考 文 献

- 〔1〕挪威船级社, 近海结构的设计、建造和检验规范, 附录 F, 基础, 海洋石油勘探开发设计研究院编译, 1981 年。
- 〔2〕API Recommended practice for Planning Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms, American Petroleum Institute, RP2A, 1982.

Analysis Calculation for the Settlement of Ground with Concrete Platform

Shu Zhiqin

Abstract

Based on the geological information of a sea region and physical and mechanical properties of foundation soil there, an analysis calculation is made for the settlement of ground with concrete platform. The calculation method used in this paper is the same as that used widely in China and in the world.