

排水条件对海洋粉质土动载后静强度的影响

黄峰 楼志刚 (中国科学院力学研究所)

摘要 本文通过不排水及排水条件下的周期三轴加载试验,对动载后南海海洋粉质土不排水静强度特性进行了研究。试验结果表明:排水过程对正常固结试样有一种强化作用,它提高了不排水静强度。在前人的成果和我们的研究工作基础上,本文提出并验证了一个预测排水过程对粉质土动载后静强度的影响的方法。

一、前言

在海洋环境中,风浪往往在建筑物地基中引起周期载荷,从而引起超静孔压而造成土层不排水静强度的不断衰减。另一方面,由于下述两个原因,超静孔压将会由于地基的排水而出现消散:①每次风暴持续的时间一般为几个小时直至几天;②在两组大波浪之间,存在着一个相对平静的时期。据现有的研究成果表明:地基的排水过程不仅减轻(甚至消除)了波浪对地基土层的软化作用,而且,有时还显著地提高了土层的不排水静强度^{[1][2]}。

二、理论模型

图1表述了周期载荷作用下试样孔隙比 e -平均有效应力 P -应力差 q 之间的关系。试样固结到状态 A 后,进行三种试验:①静剪试验(AX);②衰减试验(ABC);③不排水动剪到 B ,进行排水到 D ,然后接静剪试验($ABDE$)。可以看到,动剪作用对正常固结试样有软化作用,试样的静强度有所降低。而排水过程对试样有强化作用,它使试样的静强度有所提高。图中 B 、 D 两点都处在一种类似的超固结状态上,这种状态称为“拟超固结状态”。 B 、 D 两点的拟超固结比分别为

$$n_{qB} = p'_i / p'_B, n_{qD} = p'_F / P'_i。$$

Yasuhara 等学者^[3]从超固结土的强度公式(2-1)出发,通过假设处于拟超固结状态的试样和超固结试样具有类似的性质,导出了 B 、 D 两点的静强度预测公式(即(2-2)式和(2-3)式)。通过这两式可以从和 P'_i 相应的 c_u 及 $(\Delta u)_{cy}$ 值,预测出 B 、 D 两点的静强度值。

$$(c_u/P')_{oc} / (c_u/P')_{nc} = n^{\lambda_0} \quad (2-1)$$

$$c_{ub}/c_{ui} = \left(\frac{1}{1 - (\Delta u)_{cy}/p'_i} \right)^{\frac{\lambda_0}{1-\lambda}-1} \quad (2-2)$$

$$c_{ud}/c_{ui} = \left(\frac{1}{1 - (\Delta u)_{cy}/p'_i} \right)^{\frac{\lambda_0}{1-\lambda}} \quad (2-3)$$

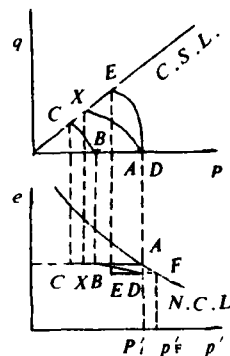


图1 应力及状态路径

式中 c_u 为不排水静强度； p' 为有效应力； n 为超固结比； Δ_0 为实验常数， OC 、 NC 分别表示超固结和正常固结， c_{ub} 、 c_{ud} 分别为试样在 B 、 D 点时的静强度， c_{ui} 为相应的正常固结状态的静强度， P'_i 为正常固结压力， $(\Delta u)_{cy}$ 为周期载荷引起的超静孔压， $\lambda=C_s/C_c$ ， C_s 、 C_c 分别为土骨架的回弹指数和压缩指数。

本文从上述理论出发，考虑多次（全部和部分）排水的情况。与 P'_i 相应的 c_{ui} 值可以由普通静剪试验得到。至于 $(\Delta u)_{cy}$ ，本文采用下述预测方法。

如图 2 所示，试样状态路径为：正常固结到 A ，受动剪到 O ，消散孔压到 D_0 ，再受动剪到 O' ，消散孔压到 D_1 ，如此下去。从 A 到 O ，产生孔压为 $(\Delta u)_{cy1}$ ，从 D_0 到 O' 为 $(\Delta u)_{cy2}$ ，……。 O 、 D_0 、 O' 、 D_1 ，…，各点的状态都是拟超固结状态。设从 A 到 O ，周期等幅应力 τ_{cy} 作用次数为 N 。从图 3 (a) (b) 中，可求得 τ_{cy}/σ'_c 相应的 $(\Delta u)_f$ 、 N_f ，由此，从图 4 可求得 N 相应的 $(\Delta u)_{cy1}$ 。其中，图 3、图 4 是一些有代表性的不排水动剪试验结果。

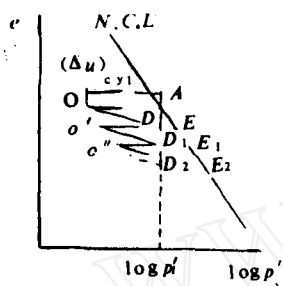


图 2 试样状态路径

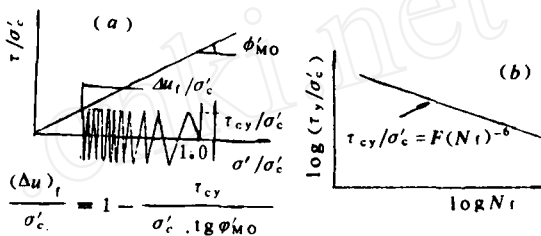


图 3 不排水动剪试验

至于 $(\Delta u)_{cy2}$ 的推求，假设 O' 点是试样正常固结到 E_0 ，然后经过 τ_{cy} 作用 $N'+N$ 次而达到（其中， τ_{cy} 作用 N' 次后达到 D_0 点）。 D_0 点和 O 点连线斜率的绝对值为 C ，经过推导，得到 E_0 点相应的固结压力为：

$$(\sigma'_c)_2 = p'_{E_0} = \left(\frac{p'_i}{p'_i - (\Delta u)_{cy1}} \right)^{\lambda'} \cdot p'_i, \quad \lambda' = C/C_c \quad (2-4)$$

从图 3 得到 $\tau_{cy}/(\sigma'_c)_2$ 相应的 $(\Delta u)_f$ 、 N_f ，从图 4 得到 $(\Delta u)'_{cy2} = p'_{E_0} - p'_i$ 相应的 N' 值，从而得到 $(N'+N)$ 相应的 $(\Delta u)_{cy}$ ，减去 $(\Delta u)'_{cy2}$ 即为 $(\Delta u)_{cy2}$ 。

上述过程可以重复下去，从而得到 $(\Delta u)_{ckj}$ ， $j=3, 4, \dots$ 。其中各消散点 D_0, D_1, D_2, \dots 相应的（正常固结线上的点 E_0, E_1, E_2, \dots 相应的）固结压力为：

$$P'_{E_i} = \prod_{i=1}^{i+1} \left(\frac{p'_i}{p'_i - (\Delta u)_{cy1}} \right)^{\lambda'} \cdot P'_i, \quad j=0, 1, 2, \dots \quad (2-5)$$

式中 $(\Delta u)_{cy1}$ 为第 1 个加载段引起的超静孔压。

对于部分排水的情况，如图 5 所示。试样状态从 A 到 O ，产生孔压 $(\Delta u)_{cy1}$ ，消散孔压 $\alpha (\Delta u)_{cy1}$ ，到 D_0 (α 是孔压消散率)，从 D_0 到 O' 产生 $(\Delta u)_{cy2}$ ，消散 $\alpha ((\Delta u)_{cy2} + (1-\alpha)(\Delta u)_{cy1})$ 后到 D_1 ，如此下去。 $(\Delta u)_{cy1}, (\Delta u)_{cy2}, \dots$ 的推求原理及步骤和全部排水情况的一样，只是各消散点 D_0, D_1, D_2, \dots 相应的有效应力不是 p'_i ，而是如式 (2-5) 所示，相应的固结压力如式 (2-6) 所示：

$$p'_{D_i} = p'_i - \sum_{(k,l)=(1,j-1)}^{(j+1,1)} (1-\alpha)^k (\Delta u)_{cy1}, \quad j=0, 1, 2, \dots \quad (2-6)$$

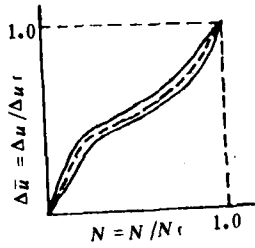


图4 孔压发展规律

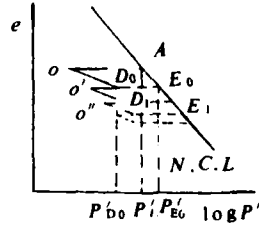


图5 部分排水试验状态路径

$$p'_{E_i} = p'_i \cdot \frac{\prod_{m=1}^{i+1} (p'_i - \sum_{(k,i)=(1,m)}^{(m,1)} (1-\alpha)^k (\Delta u)_{cy1})^k}{\prod_{n=1}^{i+1} (p'_i - \sum_{(k,\eta)=(0,n)}^{(n-1,1)} (1-\alpha)^k (\Delta u)_{cy1})^k}, \quad j=0, 1, 2, \dots \quad (2-7)$$

现在回到静强度 C_u 的预测问题上。由式 (2-2) 及式 (2-3) 已可预测 O 、 D_0 两点的 C_u ，至于 O' 点的 C_u ，可以通过用 C_{wE_0} 、 p'_{E_0} 、 $(p'_{E_0} - p'_{O'})$ 分别代替 C_{ui} 、 p'_i 、 $(\Delta u)_{cy1}$ ，然后利用 (2-2) 式得到。 D_1 、 O'' 、 D_2 、 \dots 的 C_u 预测类似。

三、实验结果及模型验证

(一) 土样颗粒分布及基本物性

本文试验所用土样取自我国南海北部湾海区，该土粘粒含量占 19%，粉粒 78%，砂粒 9%，为粉质壤土。 $G_s=2.70$ ， $W_l(\%)=15.7$ ， $W_p(\%)=28$ ， $I_p=12.3$ 。

(二) 固结试验及普通静剪试验结果

该土：压缩指数 $C_c=0.173$ ，回弹指数 $C_e=0.011$ ，于是 $\lambda=C_e/C_c=0.064$ ；对正常固结试样，存在关系： $C_u=0.28P'_i$ ；对超固结试样，关系指数 $\Lambda_0=0.79$ ，即 $C_{u0}/C_{ui} = (OCR)^{0.79-1} = (OCR)^{-0.21}$ 。

(三) 粉质土在周期载荷作用下的特性

在周期加载试验中，本文选定周期轴应变幅值 ϵ_{cy} 达到 $\pm 3\%$ 作为试样的破坏标准。

a) 不排水条件下，图 6 为 ϵ_{cy} 达到 $\pm 3\%$ 时， σ'/σ'_c 和 τ_{cy}/σ'_c 的关系成果图，下式成立：

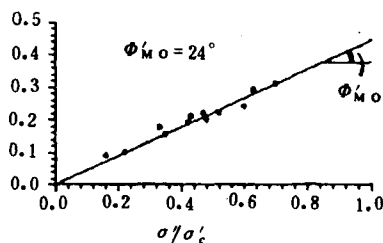


图6 试样破坏时的关系

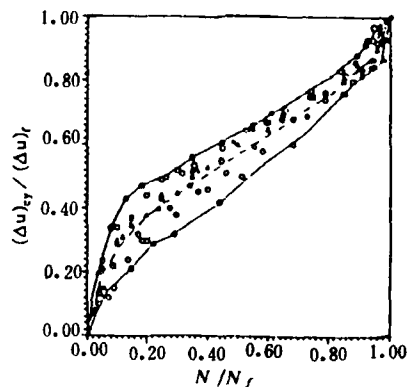


图7 孔压发展规律

$$(\Delta u)_i/\sigma'_c = 1 - \tau_{cy}/(\sigma'_c \cdot \text{tg}24^\circ) \quad (3-1)$$

动剪中孔压的发展过程如图 7 所示。其中包括了固结压力为 1.5kg/cm², 1.7kg/cm² 及 2.0kg/cm² 的试验结果。实验点拟合曲线的表达式为:

$$(\Delta u)_{cy} / (\Delta u)_i = \frac{2}{\pi} \arcsin (N/N_i)^{\frac{1}{2.94}} \quad (3-2)$$

固结压力、动剪应力和试样破坏周数之间的关系如图 8 所示, 拟合实验点得下式:

$$\tau_{cy} / \sigma'_c = 0.44 (N_i)^{-0.129} \quad (3-3)$$

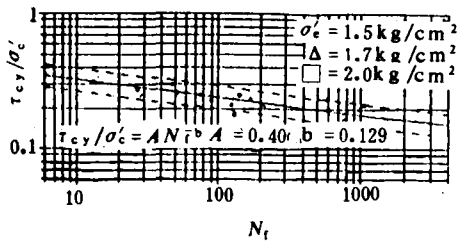


图 8 应力水平和破坏周数的关系

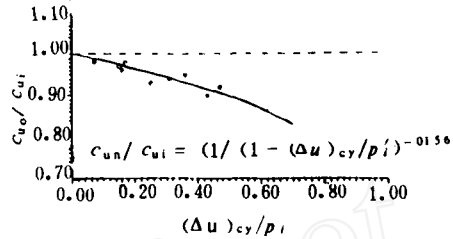


图 9 衰减试验结果

图 9 为静强度衰减试验的结果。图中的实线由方程 (2-2) 计算而得, 取 $\Lambda_0 = 0.79$, $\lambda = 0.064$ 。实验结果和实线比较相符。

b) 排水条件下, 图 10 为只经过一次全部排水过程的试样的静强度结果。表 3.1 为经过多次全部排水过程及经过一次或多次部分排水过程的试样的部分试验结果。这些结果表明, 排水过程较大地提高了试样的静强度, 而且强度提高的幅值和排水过程的次数、一定周次内排水过程的次数、消散掉的孔压等因素有关。

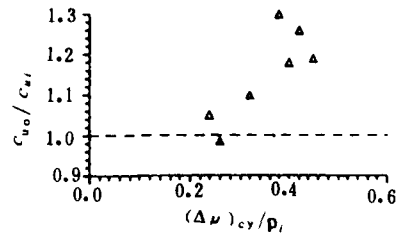


图 10 排水过程对静强度的影响

(四) 理论模型的验证

对本文所研究的海洋粉质土, 理论模型所包含的实验参数的试验结果如表 3.2 所示。利用提出的理论方法, 对 4—12 试验进行预测: ①根据 (3—3) 及 (3—1) 式, 得: 当 $\sigma'_c = 1.5 \text{ kg/cm}^2$, $\tau_{cy} / \sigma'_c = 0.23$ 时, $N_i = 152.7$ 周, $(\Delta u)_i = 0.725 \text{ kg/cm}^2$; 根据 (3—2) 式, 得 $N = 100$ 周时, $(\Delta u)_{cy} = 0.483 \text{ kg/cm}^2$; ②全部排水后, 试样状态相应的固结压力据 (2-4) 式为: $(\sigma'_c)_2 = 1.951 \text{ kg/cm}^2$; ③据 (2-2) 式, 即得此时试样的 $c_u = 0.524 \text{ kg/cm}^2$, 和实验值 $c_u = 0.50 \text{ kg/cm}^2$ 比较, 误差为 4.65%。

对甲—8、4—11 等试验进行类似的预测, 结果如表 3.3 所示, 误差都不超过 10%。

排水过程对试样静强度的影响

表 3.1

No.	σ'_c (kg/cm ²)	τ_{cy} / σ'_c	N	α (%)	c_c (kg/cm ²)
4—12	1.5	0.230	100	100	0.50
甲—7	1.5	0.220	100	100	0.53
甲—8	1.5	0.241	100	100	0.55
甲—9	1.5	0.220	2×100	100	0.54
甲—10	1.5	0.240	2×100	100	0.55

续表

No.	σ'_c (kg/cm ²)	τ_{su}/σ'_c	N	α (%)	c_c (kg/cm ²)
乙-4	1.5	0.225	2×50	20	0.48
乙-5	1.5	0.230	2×50	15	0.46
乙-9	1.5	0.220	2×25	30	0.46
乙-10	1.5	0.235	2×25	15	0.46
4-8	1.5	0.247	2×50	20	0.46
4-9	1.5	0.245	2×50	50	0.47
4-10	1.5	0.258	50	15	0.48
4-11	1.5	0.252	50	50	0.44
4-7	1.5	0.268	5×15	15	0.45

注： α 为孔压消散率=消散掉的孔压/消散前的孔压。

实验参数

表 3.2

C_c	0.173
c_u	0.011
Δ_0	0.79
k	0.28
c	0.0117
ϕ_{MO}	24°
F	0.44
b	0.129
θ	0.294

预测计算结果

表 3.3

试验号	甲-8	甲-9	甲-10	4-11	乙-5	乙-10
预测值 c_u (kg/cm ²)	0.56	0.52	0.56	0.46	0.44	0.43
实验值 c_u (kg/cm ²)	0.55	0.54	0.55	0.44	0.46	0.46
误差 (%)	2.24	3.56	2.24	3.51	3.52	6.52

四、结 语

1. 粉质土的 c_{uo}/c_{ui} 是超固结比 n 的函数，且 $c_{uo}/c_{ui} = n^{\Delta_0 - 1}$ ， Δ_0 为实验常数。
2. 在不排水动剪中，对粉质土试样存在下列关系，其中 θ 、 F 、 b 是实验常数： $(\Delta u)_{cy}/(\Delta u)_t = (2/\pi) \arcsin(N/N_t)^{1/\theta}$ ， $\tau_{cy}/\sigma'_c = F(N_t)^{-b}$ ，且和固结压力无关。
3. 粉质土试样受到动载作用而不进行排水时，静强度将会降低；而如果进行排水，则静强度将会提高，静强度提高的幅值随排水过程的次数和消散掉的孔压的增加而增加。
4. 所提出的理论预测模型，预测静强度时误差不超过 10%。

参 考 文 献

- [1] Brown, S. F. Andersen K. H. ,“The Effect of Drainage on Cyclic Loading of Coay”,Pro. Int Conf. on Soil Mech. and Found. Eng, Vol. 2, Tokyo, Japan, 1977, pp: 195—200。
- [2] 钱寿易,楼志刚,杜金声,“海洋波浪作用下土动力特性的研究现状和发展”,岩土工程学报, Vol. 4 (1),1982 ,pp. 16—23。
- [3] Yasuhara, K. ,et al. ,“Undrained Shear Behaviour of Qusai—Overconsolidated Seabed Clay Induced by Cycilc Loading”,Pro. 1983,IUTAM Symp. Seabed Mechanics.

www.cnki.net