

海底土动力特性预测模型的探讨

黄 锋 楼志刚 赵 京

(中国科学院力学研究所)

提 要 本文提出了一个从正常固结海底土在等幅周期载荷作用下的不排水动力特性预测正常固结海底土在其它条件下的动力特性的方法。其中,考虑了非均一的应力水平及排水条件等因素的影响。用该方法对一种取自北部湾的海洋粉质土的动力特性进行预测,其预测结果和试验结果比较相符。

关键词 海底土 动力特性 预测模型

在海洋环境中,风浪往往在海工建筑物地基中引起周期载荷,从而在地基中引起超静孔压而使得地基土层中有效应力及静强度不断减小。风浪强度是不断变化的,而且,在两组大波浪之间有一个相对平静的时期,在这期间,地基会向周围渗出水而使得地基中的超静孔压有所消散。为了研究这些条件下海底土的特性,本文进行了一系列不排水及排水条件下,应力水平均一及不均一的三轴周期加载试验。并在前人提出的拟超固结假设及我们的研究工作基础上,提出并验证了一个从通常的不排水等幅周期载荷作用下正常固结土的特性预测在不均一的应力水平及包含排水过程条件下正常固结土的动力特性的方法。

一 实验结果分析

1.1 基本土性

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。 $G_s=2.70$, $w_l(\%)=15.7$, $w_p(\%)=28$, $I_p(\%)=12.3$ 。

试样干密度为 $1.58\text{g}/\text{cm}^3$ 时,①压缩指数 $C_c=0.73$, $C_s=0.011$, $\lambda=C_s/C_c=0.064$; ②对正常固结试样,静强度 C_u 和固结压力 p'_i 之间存在关系: $C_u=0.28p'_i$; ③对超固结试样,超固结静强度 C_{uo} 、相应的正常固结静强度 C_{un} 和超固结比 OCR 之间,存在关系: $C_{uo}/C_{un}=(OCR)^{\Lambda_0-1}=(OCR)^{-0.21}$, 其中实验常数 $\Lambda_0=0.79$ 。

1.2 在周期载荷作用下的土性

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

a) 在应力水平均一且不排水条件下

图 1.1 为典型的不排水动剪中动应力 τ_{cy} 、轴变 ε_{cy} 及孔压 $(\Delta u)_{cy}$ 的过程图。一开始 ε_{cy} 发展缓慢,孔压不断上升,当孔压积累到一定值后, ε_{cy} 发展加快,当 ε_{cy} 达到 $\pm 1\%$ 时, τ_{cy} 幅值开始畸变,试样开始失稳,当 ε_{cy} 达到 $\pm 3\%$ 时, ε_{cy} 发展很迅猛了,这时 $(\Delta u)_{cy}/\sigma'_c$ 远未达到 1。孔压中平均累积孔压占绝大部分,瞬态波动孔压很小。轴变中,平均轴变基本上没有发生。

图 1.2 为动孔压的发展过程,其中包括了固结压力为 150kpa、170kpa 和 200kpa 的试验结果,实验点拟合曲线为:

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

其中, $(\Delta u)_{cy}$ 为破坏孔压, N 为周数, N_f 为破坏周数。

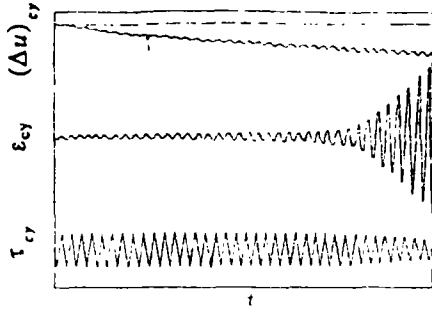


图 1.1 不排水动剪中孔压、轴变和动应力过程

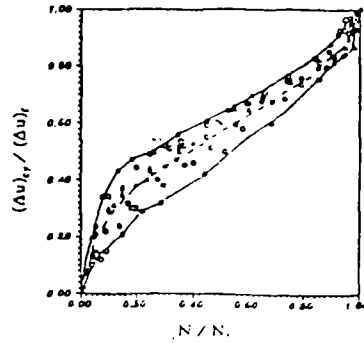


图 1.2 孔压发展规律

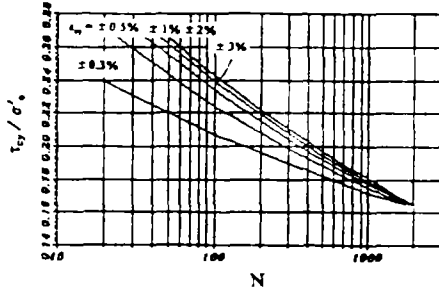


图 1.3 $\tau_{cy} / \sigma'_c \sim \varepsilon_{cy} \sim N$ 关系

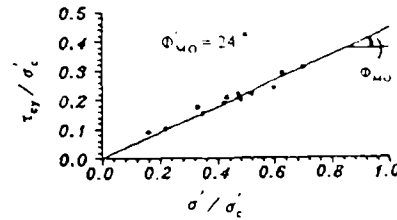


图 1.4 试样破坏时关系

图 1.3 为 $\tau_{cy} / \sigma'_c \sim \varepsilon_{cy} \sim N$ 的关系成果 (σ'_c 为固结压力)。

当 ε_{cy} 达到 $\pm 3\%$ 时, 下式成立 (见图 1.4):

$$(\Delta u)_f / \sigma'_c = 1 - \tau_{cy} / (\sigma'_c \cdot \lg 24^\circ) \quad (1-2)$$

应力水平 τ_{cy} / σ'_c 和 N_f 之间的关系如图 1.5 所示,

拟合实验点得下式:

$$\tau_{cy} / \sigma'_c = 0.44(N_f)^{-0.129} \quad (1-3)$$

b) 排水条件下

表 1.1 为三个排水条件下的动剪试验结果, 它们将

用于预测方法的验证。这些结果表明, 排水过程降低了在后续不排水动剪中孔压的积累速度, 提高了试样的动强度 (因篇幅有限, 故不作具体分析)。

表 1.1 排水条件动剪试验

项目 试验号	σ'_c (kpa)	τ_{cy} (kpa)	$(\Delta u)_{w1}$ (kpa)	N_1	N_2	N_f	$(\Delta u)_{wf}$ (kpa)	
B1	150	36.0	N=1-100	72	1110	1121	1125	106
B2	150	34.5	N=1-100	66	1722	1740	1755	87
B3	150	33.0	N=1-100	52	1790	1805	1815	74

c) 变应力水平不排水条件下

表 1.2 为几个应力水平发生变化的不排水试验结果。这些结果也将用于预测方法的验证。应力水平的变化引起了孔压积累速度的变化, 而且应力水平变化瞬间, 轴变幅值也有一个突变。

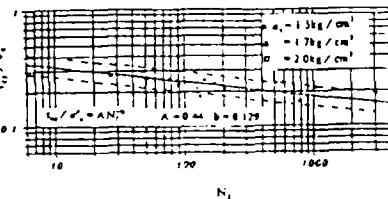


图 1.5 应力水平和破坏周数的关系

表 1.2 变应力水平不排水动剪试验

项目 试验号	σ'_c (kpa)	$\tau_w / C_s (NC)$	$(\Delta u)_{w1}$ (kpa)	Δu_w	N_1	N_2	N_f	$(\Delta u)_{wf}$ (kpa)
A1	170	0.65 N=1-800 0.73 N=800-	86	0.1	953	964	971	113
A2	200	0.70 N=1-400 0.80 N=400-	67	0.17	530	542	550	110
A3	150	0.83 N=1-100 0.88 N=100-	63	0.25	106	113	117	87

二 理论模型及验证

2.1 拟超固结假设

如图 2.1, 正常固结试样受不排水动剪作用, 产生孔压 $(\Delta u)_{cy}$, 状态从 A 变到 O, 然后进行排水消散掉全部孔压, 试样状态从 O 变到 D。可以看到, O、D 都处在一种类似超固结的状态上, 这种状态即为所谓的拟超固结状态, O、D 两点的拟超固结比分别定义为 $n_{q_0} = p'_1 / p'_0$, $n_{q_d} = p'_B / p'_1$ 。众多学者⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾已通过试验得到: 拟超固结试样和超固结试样具有类似的性质。

2.2 预测方法及验证

对超固结土, 存在(3-1)式, 其中 C_u 为静强度, Λ_0 为实验常数:

$$(C_u)_{OC} / (C_u)_{NC} = (OCR)^{\Lambda_0 - 1} \quad (2-1)$$

应用拟超固结假设, 通过推导, 得到 O、D 两点的静强度公式为(其中 $\lambda = C_s / C_c$)

$$C_{u0} / C_{u1} = (n_{q_0})^{\frac{\Lambda_0}{1-\lambda} - 1} \quad (2-2)$$

$$C_{ud} / C_{u1} = (n_{q_d})^{\frac{\Lambda_0}{1-\lambda} - 1} \quad (2-2')$$

上两式可合成一式, 即

$$\frac{C_u(QOCR)}{C_u(OC)} = (n_q)^{\frac{\Lambda_0}{1-\lambda} - 1} \quad (2-2'')$$

引进周期应力 τ_{cy} , 得

$$\frac{\tau_{cy}}{C_u(QOCR)} = \frac{\tau_{cy}}{C_u(OC)} (n_q)^{\frac{\Lambda_0}{1-\lambda} - 1} \quad (2-3)$$

该式的含义是: 对一个 τ_{cy} 恒定的不排水动剪试验, 随着动载作用次数 N 的增加, n_q 随着增加, 而相应的 $C_u(QOCR)$ 降低, 从而 $\tau_{cy} / C_u(QOCR)$ 增加, 可以认为, $\tau_{cy} / C_u(QOCR)$ 是 n_q 的函数, 其表述即为(2-3)式。

通过试验可得到图 2.2, 其中 $\tau_{cy} / C_u(QOCR)$ 是根据式(2-3)计数得到, 而 $n_q = p'_{NC} / (p'_{NC} - (\Delta u)_{cy})$, p'_{NC} 为计数点对应的固结压力。图中每一横向曲线对应于一个 τ_{cy} 不变的不排水动剪试验。应用该图即可对该土在其它条件下的动力特性进行预测。如预测一个 $OCR = n$, $N = 1$ 时 $\tau_{cy} / C_u(OCR) = m$ 的试验, 步骤为: ① 求出相应的 n_q 和 $\tau_{cy} / C_u(QOCR)$ ($n_q = n^{1-\lambda}$, $\tau_{cy} / C_u(QOCR) = \tau_{cy} / C_u(OCR)$); ② 代入(2-3)式, 得到 $\tau_{cy} / C_u(OC)$; ③ 用内插法在图 2.2 中绘出 $N = 1$ 时的 $\tau_{cy} / C_u(QOCR) = \tau_{cy} / C_u(OC)$ 的曲线, 如图中 abc 所示, b 点的纵坐标为 m , bc 即为相应于 $OCR = n$, $N = 1$ 时 $\tau_{cy} / C_u(OCR) = m$ 的试验曲线。

对于本文所研究的海洋土, 具体的图 2.2 如图 2.3 所示。对试验 A1 进行预测(见图 2.3(a)): ① 用内插法绘出 $N = 1$ 时 $\tau_{cy} / C_u(QOCR) = 0.65$ 的曲线 AO 及 $\tau_{cy} / C_u(QOCR) = 0.73$ 的曲线 A'O'O''C, 其中 O 点的横坐标为 800, O' 和 O 点处在一等 ε_{cy} 线上, O'' 和 O' 的 ε_{cy} 的差等于 $\Delta \varepsilon_{cy} = 0.1\%$; ②

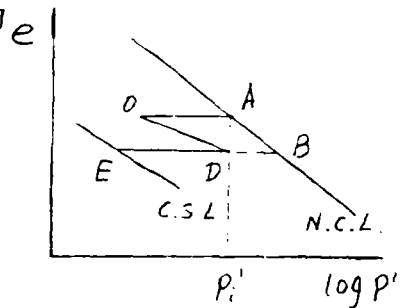


图 2.1 试样状态图

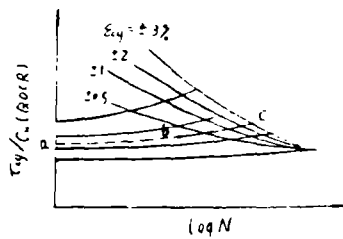


图 2.2 预测方法

AOO''C 即为对应 A1 试验曲线, $N_f = N_c - N_o'' + 800 = 890$. 对试验 B1 进行预测(见图 2.3(b) (c)): ① 绘出 $N=1$ 时 $\tau_{cy} / C_u(QOCR) = \tau_{cy} / C_u(NC) = 0.86$ 的曲线 AO, O 点的横坐标为 $N=100$; ② 根据 $C_u(NC) = 0.28\sigma'_c$, 及式(2-1)、(2-2)、(2-3), 可求得在 O 点时 $(\Delta u)_{cy} = 57.87\text{kpa}$; ③ $p'_b = (p'_i / (p'_i - (\Delta u)_{cy}))^4 \cdot p'_i = 208.58\text{kpa}$; ④ 绘出 $N=1$ 时 $\tau_{cy} / C_u(QOCR) = \tau_{cy} / (0.28p'_b) = 0.62$ 的曲线 BDE. 因 D 点的 $n_q = p'_b / p'_i = 1.39$, 据(2-3)式, D 点的纵坐标 $\tau_{cy} / C_u(QOCR) = 0.65$, DE 即为排水后进行动剪的试验曲线.

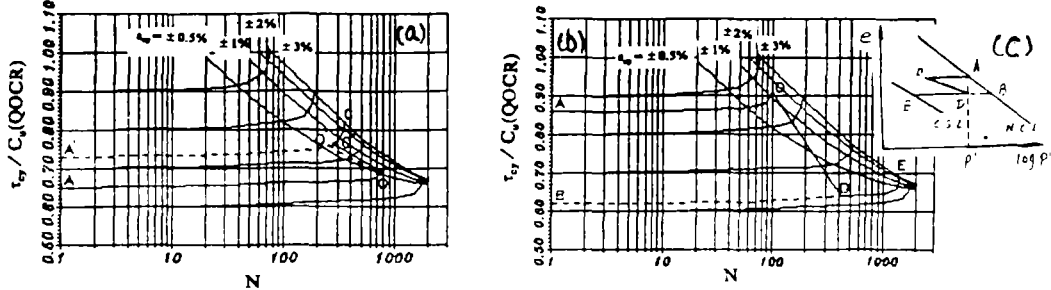


图 2.3 预测方法的验证

表 2.1 预测结果

对 A2、B2 等试验进行类似的预测结果如表 2.1 所示. 其中, N_1 、 N_2 、 N_f 分别为 $\epsilon_{cy} = \pm 1\%$ 、 $\pm 2\%$ 、 $\pm 3\%$ 时的周数, $(\Delta u)_f$ 为破坏孔压. 特别地, 对排水试验, $(\Delta u)_f = (\Delta u)_E - (\Delta u)_D$, $N_1 = N_{1\%} - N_D + 100$, $N_{1\%}$ 为图中 $\epsilon_{cy} = \pm 1\%$ 时的周数, N_2 、 N_f 类似. 变应力水平的 N_1 、 N_2 、 N_f 和排水试验的类似. 从表中可以看到, 各项误差不超过 20%.

试验号	项目				
	N_1	N_2	N_f	$(\Delta u)_f$ (kpa)	
A1	实验值	933	964	971	113
	预测值	845	870	890	101
	误差(%)	11.33	9.47	8.34	10.62
A2	实验值	530	542	590	110
	预测值	427	442	453	93
	误差(%)	19.43	18.45	17.64	13.64
A3	实验值	106	113	117	87
	预测值	102	125	130	81
	误差(%)	3.77	9.60	12.89	8.05
B1	实验值	1110	1121	1125	106
	预测值	994	1052	1074	94
	误差(%)	10.45	5.98	4.53	11.32
B2	实验值	1722	1740	1755	87
	预测值	1543	1580	1621	92
	误差(%)	10.39	9.20	7.64	5.43
B3	实验值	1790	1805	1815	74
	预测值	1710	1750	1770	66
	误差(%)	4.47	3.05	2.48	13.95

三、结论

本文从拟超固结假设出发, 提出了一个从正常固结土在应力水平均一的不排水动剪中的特性预测该土在其他条件下的动力特性的方法, 可预测试验过程中任一时刻的 $(\Delta u)_{cy}$ 、 ϵ_{cy} 等值. 文章中, 特别考虑了不均匀的应力水平条件和排水条件的情况, 用该方法对北部湾粉质壤土进行预测, 其预测结果与试验结果相比, 误差不超过 20%.

参考文献

1. Yasuhara, K. et al., "Undrained Shear Behaviour of Quasi-Overconsolidated Seabed Clay Induced by Cyclic Loading", Proc. 1983, IUTAM Symp. Seabed Mechanics.
2. Azzouz, A. S., et al., "Cyclic Behavior of Clays in Undrained Simple shear". J. Geotech. Engng. ASCE, Vol. 115, No. 5, pp. 637-657.
3. Matsui, T. and Abe, N., "Behavior of Clay on Cyclic Stress-strain History", Proc. 10th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo, Japan, 1981, Vol. 3, pp. 261-262.
4. Matsui, T. et al., "Cyclic Stress-strain History and Shear Characteristics of Clay". J. Geotech. Engng. ASCE, Vol. 106(10), pp. 1101-1120.