

# 取自渤海海底重塑土样的强度-变形性质

中国科学院力学研究所 楼志刚 杜金声

## 一、前言

在近海平台建筑物的地基岩土工程中，必须认识到海底土的强度-变形性质，这对于建筑物的经济和安全来说是至关重要的。

海洋沉积物极不均匀。为探索海洋土的基本规律，我们采用了由渤海海底取得的土样，在试验室重塑后进行了试验。重塑的目的是保证试样均匀。

试验研究工作分两大类：（1）海洋土在静力荷载作用下的特性。重点是：剪切的应变速率和超固结度对强度的影响。（2）在反复荷载作用下海洋土的特性。主要研究

了正常固结土在反复荷载作用下的残余应变和残余孔隙水压力之间的关系，以及重复加载历史对土的性能的影响（前一部分已发表于岩土工程学报〔总24〕）。

## 二、反复荷载作用下的试验结果及其分析

### 1. 正常固结土的残余应变与残余孔隙水压力的关系

图1(a)、1(b)表示在 $q-p'$ 平面上的有效应力路径（其中 $q = \sigma_1 - \sigma_3$ ， $p' = \frac{1}{3}(\sigma_1' + \sigma_2' + \sigma_3')$ ）。从图1(a)可以看出，加荷过程中产生的孔隙水压力由 $\Delta u_1$ 、 $\Delta u_2$ 、 $\Delta u_3$ 三部分组成。若把孔隙水压力看作所用应力的函数， $\Delta u_1$ 是由球应力 $\frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ 所产生， $\Delta u_2$ 是由偏应力引起的剪胀性所产生， $\Delta u_3$ 应该是由偏应力的反复作用所产生的。在卸载过程中， $\Delta u_1$ 应该是可恢复的， $\Delta u_2$ 和 $\Delta u_3$ 是不可恢复的。但从图1(a)的第一次反复加载的有效应力路径中可看到， $\Delta u_1$ 基本也是不可恢复的。为分析这种现象，请参看图2。图2(a)是一次加载和卸载的应力-应变关系，卸载后，可恢复的应变变量很小，而残余应变变量 $\epsilon_{c1}$ 很大。图2(b)是一次加载和卸载的应变和孔隙水压力的关系，同样看到卸载后可恢复的孔隙水压力力量很小，残余孔隙水压力 $u_{c1}$ 很大，这说明残余孔隙水压力与残余应变关系密切。当施加不同荷载时，卸载后的残余孔隙水压力和残余应变存在着一定的关系。试验中又发现多次反复荷载作用下残余应变和残余孔隙水压力间亦存在类似的关系。图3表示在半对数坐标中，反复荷载作用下残

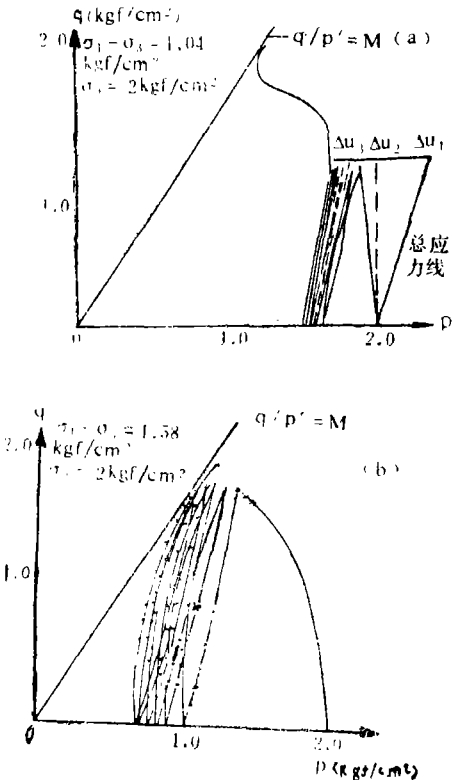


图1 反复加载试验的有效应力路径

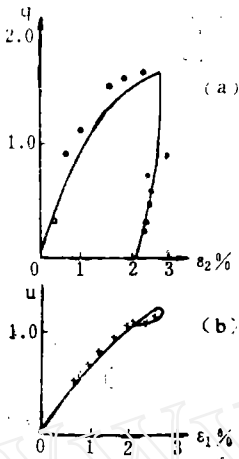


图2 应力-应变和孔隙压力-应变关系

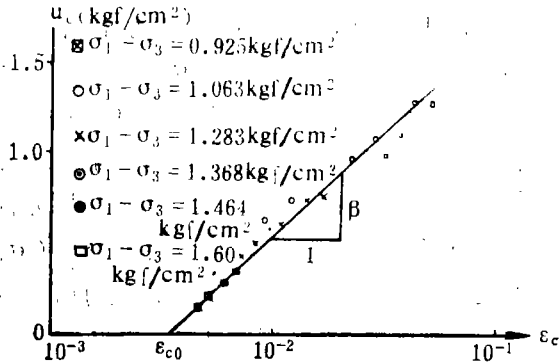


图3 反复加载后的残余应变和残余孔隙压力的关系

余应变和残余孔隙水压力之间存在的线性关系，它与施加荷载的大小和反复加载的次数无关。同时可以看到，当残余应变很小时，不引起残余孔隙水压力。

从图1中还可以看到，在较小荷载的作用下，将到达非破坏的平衡状态，而当较大荷载反复作用时，逐渐发展到破坏状态，正象Bjerrum和Yudhik所指出，存在着一个临界状态。

从图1(b)中看出，在较大荷载的反复作用下，试样到达破坏状态；这里所讲的破坏是指反复加载作用下的有效应力路径发展到与静态强度的包络线相切。在试样到

达破坏状态后，若继续施加反复荷载，其有效应力路径基本上是沿着强度包络线走的；而且在反复加载后，继续静加载的有效应力路径仍是沿着强度包络线走。这说明了试样在破坏时有相同的 $q/p' = M$ ，而与加载的方式无关。

### 2. 反复加载作用历史对土的性能的影响

研究的试样是在经受不同条件的反复加载作用后，再施加静载直到试样破坏。图4表示反复加载后静加载的有效应力路径，从中可看到反复加载作用使得静加载的有效应力路径发生迁移；随着反复加载产生的残余孔隙水压力增大，有效应力路径向左迁移，从正常固结状态的有效应力路径变为类似超固结状态的有效应力路径。试样的破坏则发生于相同的 $q/p' = M$ 条件下，但是，类似于超固结状态试样的破坏，则发生在较低的 $q$ 值处。这是由于反复加载作用产生的残余孔隙水压力使有效应力减小所造成的。

图5(a)表示反复加载后，静加载过程中的孔隙水压力和应变的关系。由于反复加载条件不同，产生的孔隙水压力和残余应变不同，在静加载中，孔隙水压力随应变的发展有两种情况：当反复加载所产生的残余孔隙水压力较小时，也就是等效超固结比 $\sigma_c'/p'$ 比较小时，静加载过程中的孔隙水压力随应变而增大。当反复加载所产生的残余孔隙压

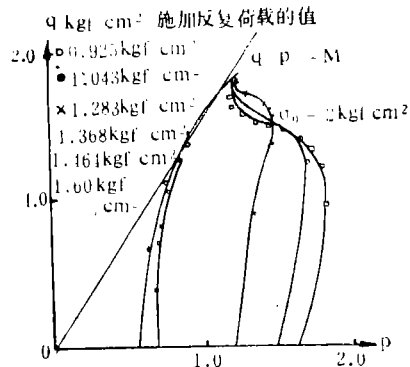


图4 反复加载后单调加载的有效应力路径

力较大时，也就是 $\sigma_c' / p'$ 较大时，当静加载时，孔隙水压力开始有一些增加，然后就随着应变增大而减小。值得注意的是，当应变增加到足够大，即接近于15%时，不管以前反复荷载历史如何，孔隙水压力总是趋于一个稳定的常值。

以下探讨反复加载历史对静强度的影响：从图5(b)的反复加载后静加载的应力-应变关系中可看到，当以 $q_1 = 15\%$ 作为破坏状态时，强度的减少不明显，约为10%。这是由于试样是重塑的，对于原状土样由于反复加载，强度将会有明显的变化。

但是，从图4的反复加载后静加载的有效应力路径上可看出，当反复加载引起的残余应变和残余孔隙水压力比较小时，其有效应力路径达到强度包络线的 $q$ 值与上面由 $q_1 = 15\%$ 所确定的 $q$ 值是一致的。当反复加载引起的残余应变和残余孔隙水压力较大时，

其有效应力路径达到强度包络线的 $q$ 值（相应的应变较低）比上面 $q_1 = 15\%$ 确定的 $q$ 值为小，然后，由于孔隙水压力随应变的发展而有所降低，致使有效应力路径沿着强度包络线向上发展，最后，应变为15%的 $q$ 值与上面 $q_1 = 15\%$ 所确定的值是一致的。

### 三、结论

根据以上工作，获得如下初步结论：

1. 在反复荷载作用下正常固结土层中，孔隙水压力与应变的关系十分密切，残余孔隙水压力和残余应变之间存在着单一关系，而不依赖于所施加的荷载大小和加载次数。
2. 反复荷载作用存在着一个临界值。当荷载大于临界值时，反复加载会导致土体的破坏；相反，当荷载小于临界值时，反复加载使土体趋于非破坏的平衡状态。
3. 反复荷载作用使以后的静加载的有效应力路径发生变迁，由类似正常固结状态的有效应力路径向类似于超固结状态的有效应力路径变化。

4. 关于反复荷载作用对静强度的影响，对重塑土来说是不明显的，对于本次研究的土样为10%左右。这是由于重塑土没有结构性能所致。由于反复荷载作用对原状土结构产生破坏，其强度将会有明显的降低。

以上仅是初步的结论，许多问题尚待进一步探讨。本次研究所用土样，系由渤海石油公司设计研究院提供，谨此致谢。

参考文献（略）

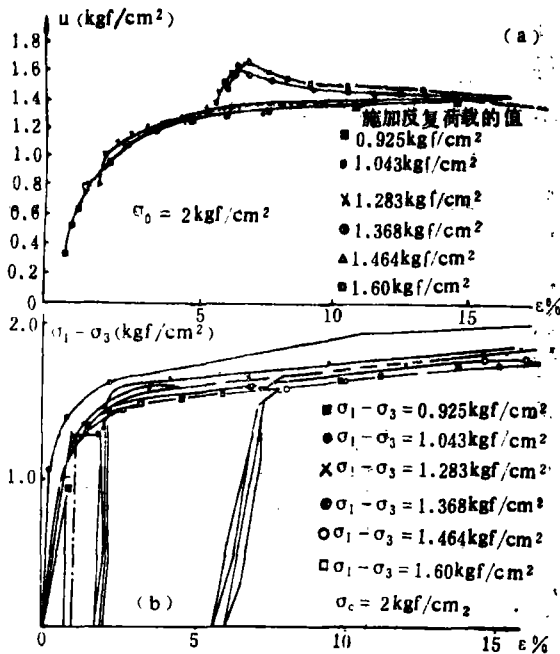


图5 反复加载后单调加载的应力-应变和孔隙水压力-应变的关系