

卸荷作用下淤泥变形规律的试验研究

师旭超^{1,2}, 汪 稔², 韩 阳¹

(1. 郑州工程学院 建工系, 河南 郑州 450052; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘 要: 随着我国基础设施建设步伐的加快, 在越来越多的工程中要涉及到对回弹变形的分析。通过大量试验, 研究了淤泥在卸荷作用下的变形特性。淤泥的回弹变形存在临界卸荷比, 当淤泥卸荷比小于临界卸荷比时, 淤泥不发生回弹变形; 当卸荷比大于临界卸荷比时, 淤泥发生回弹变形, 回弹变形可以分为主回弹变形、次回弹变形、附加次固结变形三部分, 附加次固结变形的实质仍然是土骨架的蠕变。

关 键 词: 淤泥; 固结; 回弹; 卸荷

中图分类号: TU 447

文献标识码: A

Test research on deformation properties of ooze under unloading

SHI Xu-chao^{1,2}, WANG Ren², HAN Yang¹

(1. Department of Civil Engineering, Zhengzhou Institute of Technology, Zhengzhou 450052, China;

2. Institute of Rock and soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: There are many settlement deformation analyses about soft soil ground in the past engineering practice. With the rapid development of infrastructure construction, the rebound deformation analyses are needed in many engineerings. Deformation properties under unloading have been studied through large numbers of tests. For the ooze's rebound defamation, a critical unload ratio is existed. When ooze's unload ratio is lower than critical unload ratio, rebound deformation doesn't happen; when ooze's unload ratio is higher than critical unload ratio, rebound deformation will happen. The ooze's deformation after unloading is divided into primary rebound; secondary rebound and appending secondary consolidation deformation. The essential of appending secondary consolidation deformation is creeping of soil framework.

Key words: ooze; consolidation; rebound; unloading

1 前 言

在土木建筑、水利水电、公路交通等众多的工程建设中, 人们会遇到大量的淤泥类软粘土地基, 而软粘土地基的变形分析在岩土工程设计中又占有特别重要的地位。国内外学者对淤泥类软粘土的沉降变形进行了深入地研究, 取得了显著成果。同时, 国内外许多学者对软土在卸荷方面的问题进行了研究。魏汝龙^[1]提出了估算正常压密粘土在开挖卸荷后的不排水抗剪强度方法; 陈永福, 曹名葆^[2]分析了上海软土在卸荷-再加荷时的变形特性, 通过侧限试验得出回弹指数, 通过三轴试验研究了对于卸荷-再加荷作用下土体的抗剪强度; 刘祖德, 孔官瑞^[3]研究了平面应变条件下膨胀土的卸荷变形问题;

刘国彬, 侯学渊^[4]研究了上海软土的卸荷模量; 潘林有, 胡中雄^[5, 6]等研究了卸荷状态下土的回弹及强度问题; 李广信, 武世锋^[7]研究了土的卸载体缩现象及其变形机理。在孔隙水压力方面, 王铁儒等^[8]考虑土体非线性变形特性, 提出了适合不同总应力路径的孔隙水压力方程及土体临界孔隙水压力计算式; 周健、王浩等^[9]从理论分析和试验基础上对软粘土的卸荷孔压特性进行了研究; 魏汝龙等^[1, 10, 11]分析了是否考虑减缩性计算孔压的差异, 并对软粘土孔压特性的归一化问题进行了分析, 但是, 对于淤泥类软土卸荷回弹变形的研究, 在国内外进行的并不广泛, 因此更有必要加强对其回弹变形特性的研究, 为淤泥类软粘土在卸荷作用下的变形计算提供理论依据。

2 土工试验的设计

为了深入研究淤泥在经受卸荷作用后的变形特性，需要进行大量的长时间的试验。室内土工试验是利用多联固结仪与常规压缩仪研究分析淤泥在卸荷后的变形特性。用常规压缩仪来模拟土体在经受大面积卸荷后的变形特性，由试验可以分析淤泥在卸荷以后长时间的变形规律与特点。本次试验的试样系从某工地利用取土器细心取得，并在运输过程中使扰动减小到最低限度，试样保持了较高的原状性。根据试验结果统计的淤泥的物理性质指标：天然含水量为 45%~50%，比重为 2.70，天然孔隙比为 1.30~1.5，重度为 17.8 kN/m³，液限为 42%~45%，塑限为 23%~26%。

2.1 淤泥的回弹变形试验

淤泥类软土本身具有很高的压缩性，其在受到卸荷作用后回弹变形与其它粘土有很大的不同，为使实验取得更充分的数据，在多联固结仪上进行。每个荷载水平下做三组平行试验，试验土样为原状土，按照土工试验规定制备，在多联固结仪上预压。试样高度为 2 cm，试样面积为 30 cm²。试验过程中利用空调设备保持实验室内温度恒定。土样预压荷载分别为 100, 200, 300, 400 kPa。固结时间为 24 h，然后按不同比例卸荷，变形稳定时间定为 24 h。由此研究淤泥在不同卸荷水平下的变形规律。

2.2 淤泥超载预压后的长时间变形

上述试验由于时间的限制，主要研究的是淤泥试样在短时间内的变形特性。实际上，像淤泥这种特殊的饱和软粘土，其变形在很长的时间内都在变化，为了更深入地研究淤泥在经受超载预压后的变形特性，就必须使试验有足够长的时间。试验装置采用常规压缩仪。考虑到工程中遇到的实际情况，先将试样预压到 100 kPa，所加荷载增量分别为 50, 100, 200 kPa。然后，卸荷至 100 kPa；固结时间定为 100 min。观察土样变形的时间为 30 d，实验室内保持恒温条件。

3 试验结果分析

3.1 淤泥的回弹变形分析

为了更好地分析在卸荷作用下淤泥土样的回弹变形分析，特别定义以下概念：

$$\text{卸荷比 } R: R = \frac{(P_{\max} - P_i)}{P_{\max}} \quad (1)$$

式中 P_{\max} 为最大预压荷载； P_i 为卸荷后的上覆荷载。

$$\text{回弹率 } I: I = \frac{(e_i - e_{\min})}{e_{\min}} \quad (2)$$

式中 e_{\min} 为最大预压荷载下的孔隙比； e_i 为卸荷到某荷载水平下的孔隙比。

表 1 为预压荷载下 $P = 400$ kPa 时的试验原始数据。经过整理试验结果得到图 1 所示曲线。

表 1 试验原始数据 ($P = 400$ kPa)
Table 1 The original data of test ($P = 400$ kPa)

压力 P / kPa	e_i			Δe_i			\bar{I}
	第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 1 组	第 2 组	第 3 组	
0	0.975	0.978	0.977	0.045	0.047	0.048	0.050
50	0.962	0.965	0.963	0.032	0.034	0.034	0.035
75	0.951	0.950	0.950	0.021	0.020	0.021	0.022
100	0.940	0.941	0.942	0.010	0.010	0.013	0.012
200	0.932	0.935	0.930	0.002	0.004	0.001	0.002
300	0.930	0.931	0.929	0	0	0	0
400	0.930	0.931	0.929	0	0	0	0
e_{\min}	0.930	0.931	0.929	$\bar{e}_{\min} = 0.930$			

注： \bar{I} 为回弹平均值。

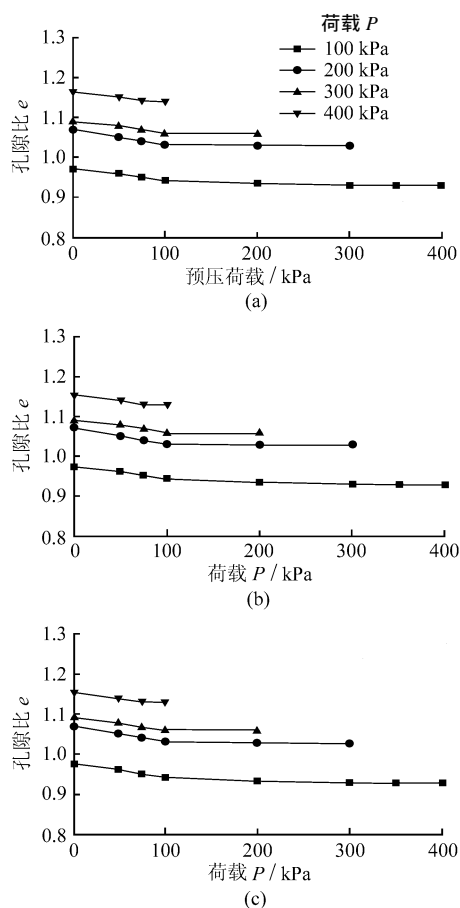


图 1 三组卸荷回弹试验

Fig.1 Three unloading rebound tests

由图 1 可以看出，淤泥卸荷后的回弹变形有以下特点：

(1) 当卸荷比较小时，回弹路径为一接近水平的直线，即不发生回弹变形；

(2) 当卸荷量达到一定水平时，才有较大的回弹变形发生；

(3) 最大回弹量与预压荷载有关。

图 2 为最大回弹率 I_{max} 与最大预压荷载 P_{max} 的关系，表 2 为不同卸荷比的回弹率。从图 2 和表 3 分析可以得到以下结论：(1) 预压荷载越大，卸荷后淤泥的回弹量越大，最大回弹率与预压荷载之间有明显的线性关系；(2) 当卸荷比小于 0.3 时，无论预压荷载为多大，其回弹变形量为零，所以，对于淤泥来讲是否发生回弹变形，存在一个临界的卸荷比，当卸荷比小于临界的卸荷比时，淤泥不发生回弹变形，根据统计结果，可以认为淤泥的临界卸荷比为 0.3。

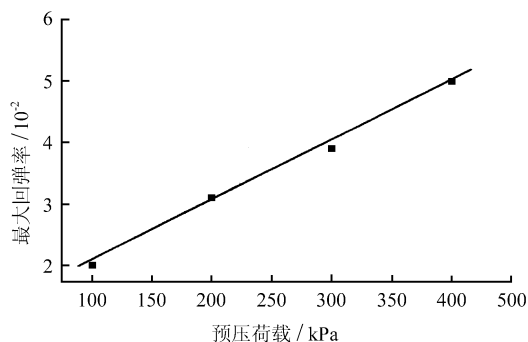


图 2 最大回弹率与预压荷载的关系
Fig.2 Relation between I_{max} and P_{max}

表 2 不同卸荷比的回弹率

Table 2 The rebound ratios under different unloading ratios

R	预压荷载 / kPa			
	100	200	300	400
0	0	0	0	0
0.25	0	0	0	0
0.3			0.002	0.002
0.5	0.011	0.010	0.007	0.005
0.6		0.009	0.010	
0.8		0.019		0.021
1.0	0.020	0.031	0.039	0.050

3.2 淤泥超载预压后的长时间变形

图 3 为淤泥在卸荷后长时间的变形与时间曲线。通过长时间的观测可以发现：(1) 当卸荷比较小时，淤泥试样不发生回弹，变形在很长时间内保持不变。但随着时间的推移，土样将产生次固结变形，此时的次固结系数与原来在卸荷前的次固结系数有了很大的不同。由于有了前期更高的固结压力，次固结系数减小，因此发生次固结的时间被推迟；(2) 当荷载比较大时，在卸荷瞬时土样即发生了回弹，并且在卸荷初期回弹变形的速率非常大，在随后的很长时间内，变形发展极其缓慢，在回弹变形达到最大值后，土样随后开始发生次固结变形，同样，此时的次固结系数与原来在卸荷前的次固结系

数有了很大的不同。次固结系数减小，而且发生次固结的时间被推迟。

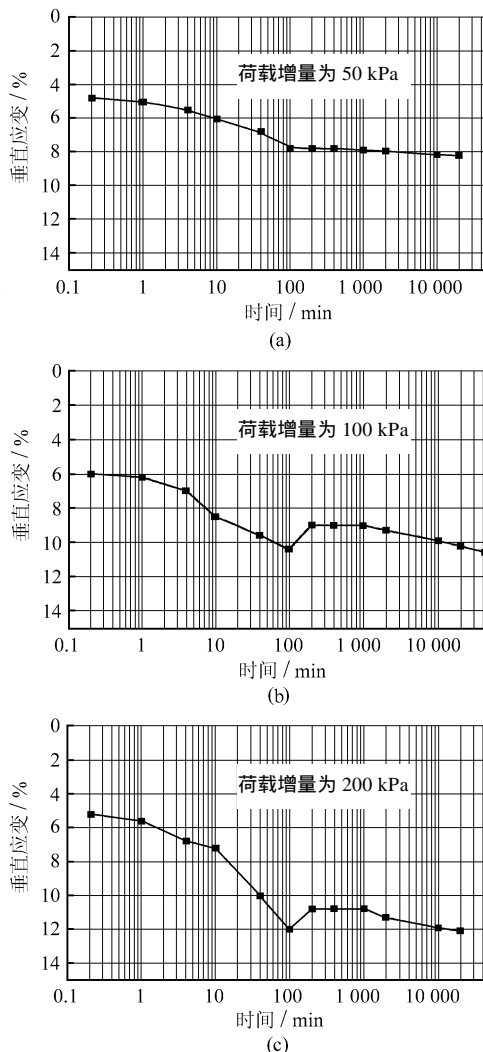


图 3 淤泥卸荷后的变形与时间曲线

Fig.3 Time-deformation curve of ooze under unloading

从对淤泥变形长时间的观测可以发现，卸荷后的变形分为三个阶段，即主回弹阶段、次回弹阶段、附加次固结阶段。其变形示意图如图 4 所示。

(1) 主回弹阶段：相对应于压缩变形的主固结阶段。软粘土在受压时，由于产生正的超孔隙水压力，使得孔隙水排出土体，由于软粘土本身特殊的微观结构使其渗透性很低，所以，排水过程极其缓慢，该过程可由太沙基固结理论来解释。同样，在卸荷时，土体中会产生负的超孔隙水压力，在固结沉降变形时排出土体的孔隙水要往孔隙内回流，正是由于水的吸入使得土体孔隙增大，土体发生了回弹变形。该过程与压缩固结过程相反，但其实质相同，所以主回弹的时间可以用固结理论来计算。

(2) 次回弹阶段：在主回弹变形完成后，淤泥的回弹变形不会停止。当土骨架所受应力减小时，

骨架之间的连接点以及在受压时被压弯的叠聚体继续释放能量,使淤泥的回弹变形继续发展,宏观表现为次回弹变形。由于淤泥特殊的孔隙特征,在该阶段,孔隙水难以再回到孔隙中。所以,次回弹变形是由淤泥土骨架本身的粘滞性决定的。主回弹的时间较短,次回弹则需很长时间才能完成,次回弹时间往往是主回弹时间的很多倍。

(3) 附加次固结阶段:对于受卸荷作用下的淤泥类软土地基,其回弹变形在工程应用上来说是很小的,起重要作用的仍然是回弹变形以后的附加次固结变形。其实质也就是由于淤泥土骨架的粘滞蠕变作用产生的。

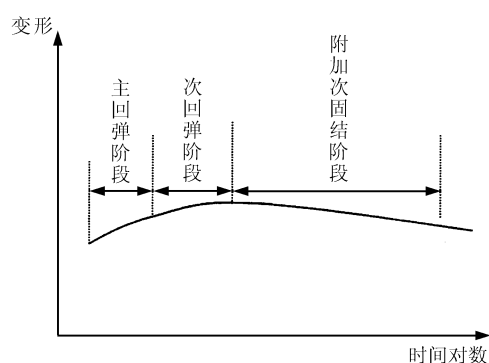


图4 淤泥卸荷后的变形示意图

Fig. 4 The deformation sketch map of ooze after unloading

4 结论

(1) 通过对淤泥回弹变形的分析可知,淤泥的卸荷回弹变形存在一个临界卸荷比;根据统计结果,临界卸荷比约为0.3;当卸荷比小于临界卸荷比时,淤泥不发生回弹变形。

(2) 预压荷载越大,卸荷后淤泥的回弹量越大,最大回弹率与预压荷载之间有明显的线性关系。

(3) 从长时间范围来看,淤泥卸荷后的变形分为三个阶段即主回弹阶段、次回弹阶段、附加次固结变形阶段。

(4) 根据试验结果认为,淤泥类软粘土地基发生的回弹以主回弹为主,主回弹现象的发生在一定程度上抵消了原本正在进行的次固结沉降。从长远角度分析,淤泥类软粘土地基发生回弹的过程是一个暂时的趋势,而发生沉降变形是必然的趋势。若关心短时期内软粘土地基的变形情况,需要分析回弹变形;若要预测几年、几十年的变形,仍旧要研究软粘土的沉降变形。

参考文献

[1] 魏汝龙. 正常压密粘土在开挖卸荷后的不排水抗剪强度[J]. 水利水运科学研究, 1984, 6(4): 39 - 43.

WEI Ru-long. The undrained shear strength of normal consolidated clay during unloading due to excavation [J]. **Hydro Science and Engineering**, 1984, 6(4): 39 - 43.

[2] 陈永福, 曹名葆. 上海地区软粘土的卸荷-再加荷变形特性[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(2): 9 - 17.

CHEN Yong-fu, CAO Ming-bao. The deformation characteristics of soft clay under unloading and reloading in Shanghai[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1990, 12(2): 9 - 17.

[3] 刘祖德, 孔官瑞. 平面应变条件下膨胀土卸荷变形研究[J]. 岩土工程学报, 1993, 15(2): 68 - 73.

LIU Zu-de, KONG Guan-rui. Study on the deformation of expansive soil under plane strain[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1993, 15(2): 68 - 73.

[4] 刘国彬, 侯学渊. 软土的卸荷模量[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(6): 18 - 23.

LIU Guo-bin, HOU Xue-yuan. Unloading modulus of the shanghai soft clay[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1996, 18(6): 18 - 23.

[5] 潘林有, 胡中雄. 深基坑卸荷回弹问题的研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(1): 101 - 104.

PAN Lin-you, HU Zhong-xiong. Experimental study on the resilience of pit under unloading[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2002, 24(1): 101 - 104.

[6] 潘林有, 胡中雄, 程玉梅. 卸荷状态下粘性土强度特性试验研究[J]. 岩土力学, 2001, 22(4): 490 - 493.

PAN Lin-you, HU Zhong-xiong, CHENG Yu-mei. Experimental study on shear strength of clay under unloading state[J]. **Rock and soil mechanics**, 2001, 22(4): 490 - 493.

[7] 李广信, 武世锋. 土的卸载体缩现象及其变形机理探讨[J]. 岩土工程学报, 2002, (1): 47 - 50.

LI Guang-xin, WU Shi-feng. Experiment research on volume contraction of soil under unloading and examination of its mechanism[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2002, 24 (1): 47 - 50.

[8] 王铁儒, 陈龙珠, 李明达. 正常固结饱和粘性土孔隙水压力性状的研究[J]. 岩土工程学报, 1987, 9(4): 23 - 32.

WANG Tie-ru, CHEN Long-zhu, LI Ming-kui. Study on pore water pressure properties of normal consolidated saturated clay[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1987, 9(4): 23 - 32.

[9] 周健, 王浩. 软土的卸载孔压特性的试验与理论计算分析[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(5): 556 - 559.

ZHOU Jian, WANG Hao. Pore pressure characteristic analysis of soft clay during unloading based on lab data and numerical calculation[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2002, 24(5): 556 - 559.

[10] 张惠明, 徐玉胜, 曾巧玲. 深圳软土变形特性与工后沉降[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(7): 509 - 514.

ZHANG Hui-ming, XU Yu-sheng, ZENG Qiao-ling. Deformation behavior of Shenzhen soft clay and post construction settlement[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2002, 24(7): 509 - 514.

[11] Taylor D W, Merchant W. A theory of clay consolidation accounting for secondary compression[J]. **Journal of Mathematics and Physics**, 1940, 19(2): 1 235 - 1 260.