

文章编号:1000-7598-(2001)04-0490-04

# 卸荷状态下粘性土强度特性试验研究

潘林有<sup>1</sup>, 程玉梅<sup>2</sup>, 胡中雄<sup>2</sup>

(1. 温州大学 建筑与土木工程学院, 浙江 温州 325027; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

**摘要:** 通过大量的室内抗剪强度试验, 提出了卸荷比、临界卸荷比、极限卸荷比和强度残留率概念。用卸荷比来衡量应力水平的变化, 以探讨粘性土在卸荷状态下强度变化规律以及估算卸荷影响区的范围和影响区内强度的衰减规律, 对基坑等卸荷类工程的设计和施工具有一定的指导意义。

**关键词:** 卸荷比; 抗剪强度; 强度残留率

中图分类号: TU 411.7 文献标识码: A

**作者简介:** 潘林有, 男, 1963年生, 工学硕士, 副教授, 从事土力学与基础工程教学与研究。

## Experimental study on the shear strength of clay under the unloading state

PAN Lin-you<sup>1</sup>, CHENG Yu-mei<sup>2</sup>, HU Zhong-Xiong<sup>2</sup>

(1. Architecture and Civil engineering college, Wenzhou University, Wenzhou 325027, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Through many direct shearing tests, shear strength of unloading was studied. The concept of unloading ratio and the residual strength were put forth. Stress level variation was evaluated by unloading ratio for studying the strength variation of clay under unloading condition, and for estimating the range of the unloading influence region, and the strength attenuation in this region. The study in this paper can provide some guidance to design and construction in such unloading projects as foundation pit.

**key words:** unloading ratio; shear strength; residual strength rate

## 1 前言

深基坑工程、地铁隧道、地下车库、露天采矿等地下工程中, 相对于原始应力场, 土体中应力水平减少。这类工程属于卸荷工程, 卸荷状态下粘性土的工程性质与加荷状态有很大差异<sup>[1,2]</sup>。由于粘性土的结构强度有影响, 如果外荷载引起土中应力小于结构强度  $P_s$  时, 阻止土体压密; 而当荷载减少时, 结构强度也会阻止土体膨胀。但在当前地下工程设计中, 很少考虑这一本质问题的影响。从而造成较大的误差, 使得设计人员对工程的安全度难于把握。

为了探讨粘性土在卸荷状态下强度特性变化的规律, 本文设计了一套试验方法, 从最简单的单向卸荷条件出发, 摸索其强度特性的变化机理。

## 2 基本试验方法设计及强度变化特性曲线

### 2.1 试验方法及卸荷强度曲线

土样取自上海浦东金张公路工地, 为原状淤泥质粘土。土样的物理指标如表1所示。

将土样分成 A, B, C 三组, 每组若干个土样, 分别

表1 试样的物理性质指标  
Table 1 Indexes of physical properties for samples

取土深度 /m	重度 $\gamma$ /kN·m <sup>-3</sup>	含水率 $\omega$ /%	相对密度 $G_s$	孔隙比 $e$	饱和度 $S_r$ /%	液限 $W_L$ /%	塑限 $W_p$ /%	塑性指数 $I_p$	液性指数 $I_L$
12~16	17.1	53.4	2.74	1.468	99.7	38.8	21.6	17.2	1.84

在直接剪切仪中, 加压至 400, 300, 200 kPa 进行固结。然后分别卸荷, 在不同竖向应力下快速剪切。得到加

荷状态和卸荷状态下的强度曲线(见图1)。

收稿日期: 2000-08-22

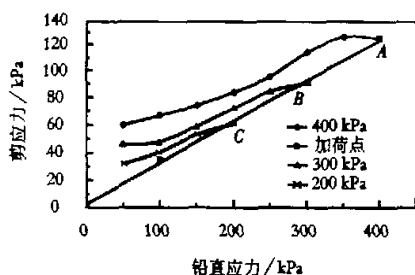


图1 从不同固结压力开始卸荷的强度路径

Fig.1 Strength paths of unloading starting from different consolidation pressure

令卸荷比  $R$  为

$$R = \frac{\Delta P}{P_0} \quad (1)$$

强度残留率  $f_r$  为

$$f_r = \frac{\Delta S}{S_0} \quad (2)$$

式中  $\Delta P$ ,  $P_0$  分别为卸荷压力和固结压力(kPa),  $\Delta P = (P_0 - P_1)$ ;  $P_1$  为剪切时竖向应力(kPa);  $\Delta S$ ,  $S_0$  分别为固结点与卸荷点抗剪强度之差和固结压力点抗剪强度(kPa)。

根据卸荷比  $R$  与强度残留率  $f_r$  绘制卸荷比与残留率关系曲线(见图2)。

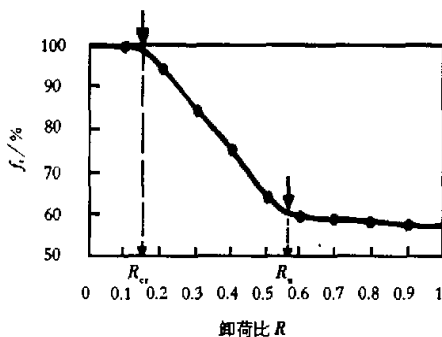


图2 卸荷比与残留率的关系

Fig.2 Relation of unloading ratio to residual rate

图2中有两个拐点。第1拐点称为临界卸荷比  $R_{cr}$ ;第2拐点称为极限卸荷比  $R_u$ 。两个拐点将曲线分成如下3个区域:

(1) 非扰动区,当卸荷比  $R$  小于临界卸荷比  $R_{cr}$  时,土的强度不变,即强度残留率为100%;

(2) 扰动区,当卸荷比  $R$  大于极限卸荷比  $R_u$  时,土的强度残留率最小,且趋近于一定值;

(3) 扰动过渡区,卸荷比在  $R_{cr}$  与  $R_u$  之间时,土的卸荷强度随着卸荷比增大而直线降低。

万方数据

### 3 卸荷比随时间变化规律

按室内常规试验确定的临界和极限卸荷比还不能直接用来估计现场卸荷区的影响范围。这是因为室内试验固结时间太短,不能与现场土层长期沉积时间相比。实际上,临界卸荷比和极限卸荷比都不是一个常数,而是与固结时间有关的变数<sup>[3]</sup>。

现取5组土样,同时加荷至300 kPa,固结时间分别为1,3,4,5,7 d和14 d。然后在快速卸荷的情况下进行剪切,得到一组不同预压时间的卸荷强度曲线,如图3所示。同样将这组卸荷强度曲线整理成卸荷比与强度、残留率之间的关系曲线(图4)。可以明显看出,临界卸荷比和极限卸荷比都随固结时间增长而增大<sup>[3,4]</sup>。临界卸荷比增加幅度比极限卸荷比大,将临界卸荷比  $R_{cr}$  和极限卸荷比  $R_u$  与固结时间的关系进行整理得到如图5所示曲线。可以看出,临界卸荷比  $R_{cr}$  与时间  $t$  之间有双曲线关系,可用下式表示:

$$R_{cr} = \frac{t}{at + b} \quad (3)$$

式中  $a, b$  为待定常数。

以  $1/R_{cr}$  为纵坐标,  $1/t$  为横坐标,将公式(3)转化为直线方程(4),得

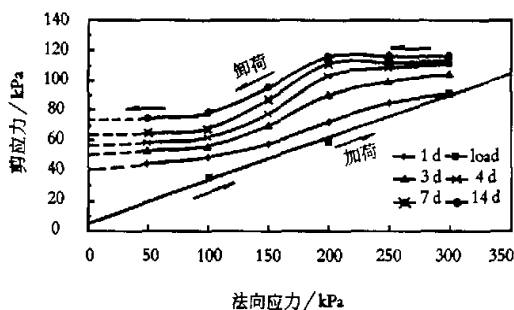


图3 不同预压时间的卸荷强度曲线

Fig.3 Unloading strength curves at different pre-pressing time

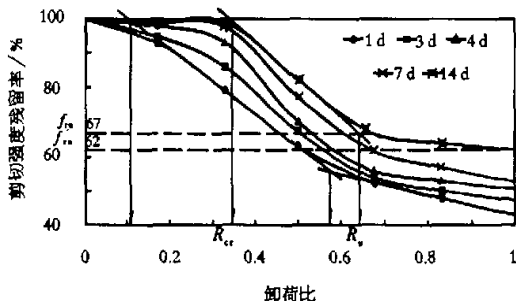


图4 不同预压时间的卸荷比与强度残留率关系

Fig.4 Unloading ratio versus residual strength rate at different pre-pressing time

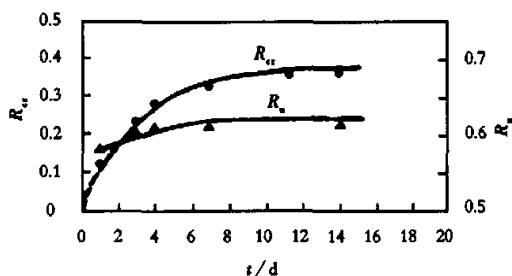


图5  $R_{cr}, R_u$  与时间  $t/d$  关系  
Fig.5 Relation of  $R_{cr}, R_u$  to time  $t/d$

$$\frac{1}{R_{cr}} = a + \frac{b}{t} \quad (4)$$

式中  $a$  为截距,  $b$  为直线斜率。

当  $t \rightarrow \infty$ ,  $[R_{cr}]_{t \rightarrow \infty} \rightarrow 1/a$ ,  $[R_{cr}]$  称为原位土层的临界卸荷比。由图 5 数据, 通过坐标变换, 得到  $a = 2.332$ ,  $b = 5.536$ , 相关系数为 0.9919。从而求得  $[R_{cr}] = 0.429$ , 得到原位临界卸荷比后就可以估算卸荷区的最大影响范围。

原位极限卸荷比  $R_u$  与固结时间关系不明显。从图 5 可以看出, 预压 14 d 的极限卸荷比  $R_u$  基本上已趋于稳定, 故可以取预压 14 d 的  $R_u$  作为原位值估算扰动区深度, 其误差不会太大, 数值约为 0.64。

#### 4 卸荷影响区强度残留率<sup>[5]</sup>

##### 4.1 极限残留率定义

所谓极限残留率就是指极限卸荷比  $R_u$  所对应的强度残留率。由于极限卸荷比  $R_u$  是按第 2 拐点取值, 从图 4 可以看出, 从极限卸荷比  $R_u = 0.64 \sim 1.0$ , 残留率还有变化, 从  $f_r = 0.67$  降至  $f_r = 0.62$ 。从理论上讲,  $f_r$  应视作扰动区下边界处的强度残留率;  $f_r$  应视为扰动区上边界的强度残留率。根据现场的实际施工情况, 取  $f_r$  作为扰动区土体强度的残留率偏于安全。

##### 4.2 强度衰减与时间关系

当瞬间卸荷后, 影响区内土体强度降低是有一个时间过程。掌握强度衰减的时间效应, 在工程实践上具有重要的指导意义, 例如深基坑开挖时, 在多少时间内浇捣垫层为好, 在多少时间内应该加上支撑等等。图 6 所示模拟试验结果, 可以在概念上加以阐明。

将一组试样, 同时加荷至 300 kPa 固结, 然后在卸荷后滞留不同时间的情况下进行剪切。图中可以明显看出, 卸荷后滞留时间越长强度越低。把不同卸荷比时的强度残留率与滞留时间关系绘制成曲线(图 7),

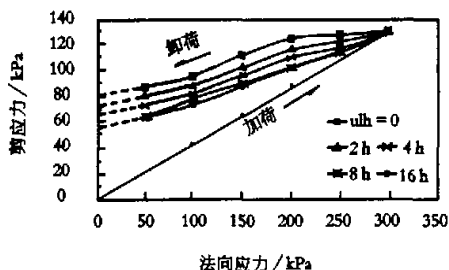


图6 卸荷后若干滞留时间的强度路径  
Fig.6 Strength path at some time after unloading

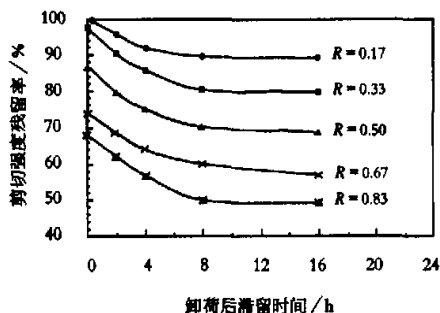


图7 不同卸荷量下的强度残留率与卸荷后滞留时间的关系  
Fig.7 Relation of residual strength ratio to retention time under different unloading quantities

发现该曲线是一组形状相似几乎平行的曲线。卸荷初期强度衰减较快, 滞留 8 h 以后强度衰减逐渐趋于平缓, 并可用双曲线公式表示强度残留率与时间关系为

$$f_{r0} - f_r = \frac{t}{at + b} \quad (5)$$

式中  $f_{r0}$  为瞬时残留率;  $f_r$  为相应于时间  $t$  的残留率;  $t$  为卸荷后滞留时间(h);  $a, b$  为待定常数, 可根据试验确定。

瞬时残留率与卸荷比  $R$  有关, 卸荷比越大, 瞬时残留率越小。根据图 7 可以得到图 8 所示瞬时残留率  $f_{r0}$  与卸荷比  $R$  的关系。在卸荷比  $R = 0.5$  的部位下, 强度瞬时损失约 12%, 而在  $R = 1.0$  的(基坑开挖面上)

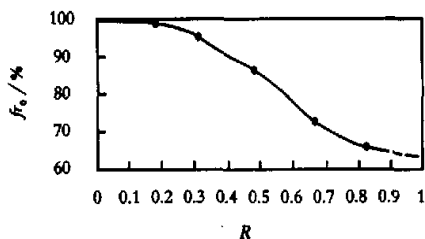


图8 瞬时残留率  $f_{r0}$  与卸荷比  $R$  的关系  
Fig.8 Relation of instant residual rate to unloading ratio

部位,强度瞬时损失达30%以上。

图7,8是根据图6试验结果得到,由于图6试验条件是土样预压时间只有24h,所以只能提供一些概念上的结果,不能用于现场工程分析。现场土体由于固结时间很长,衰减速度肯定比室内试验结果慢。

## 5 卸荷影响区估算

室内试验的应力条件主要适用于大面积卸荷的情况。假设瞬时大面积卸荷深度为 $D$ ,则可以根据原位极限卸荷比 $R_u$ 和临界卸荷比 $R_{cr}$ 分别计算出扰动区的下边界和影响区的下边界。

扰动区深度:

$$Z_u = \frac{(1 - R_u)D}{R_u} = \frac{(1 - 0.64)D}{0.64} = 0.56D$$

影响区深度:

$$Z_{cr} = \frac{(1 - R_{cr})D}{R_{cr}} = \frac{(1 - 0.429)D}{0.429} = 1.33D$$

图9表示大面积卸荷影响区的范围,扰动区的深度约为开挖深度的0.56倍,影响区的深度为1.33倍。图9右侧表示影响区土体强度变化情况,斜线部分为强度损失,余留部分为残留强度。

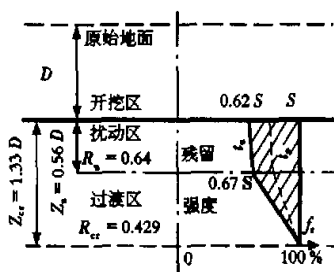


图9 大面积卸荷影响区估算

Fig.9 The estimation of large area unloading affected zone

## 6 结论

(1) 从单向固结在卸荷状态下直接剪切试验结果出发,提出了卸荷比、临界卸荷比、极限卸荷比和强度残留率的概念,并以此来估算大面积卸荷条件下,坑底影响区的范围及影响区内强度的变化。特别是通过预压时间与临界和极限卸荷比之间的关系,外推得到原位的临界和极限卸荷比的数值,具有实际的参考意义。

(2) 通过室内模拟试验结果,坑底以下扰动区的深度约为开挖深度的0.56倍,影响区的深度为1.33倍。扰动层的强度为原始强度的62%,过渡区内强度随深度直线变化。

(3) 关于强度衰减与卸荷后滞留时间的关系问题,本文只提出了一些概念性的结果,根据简单模拟试验的结果表明,卸荷后强度衰减稳定时间是不长的,这对施工有一定指导意义。

(4) 扰动区的深度和残留强度,实践上还与施工因素有密切关系,这个问题有待于现场实测资料加以修正。

## 参 考 资 料

- [1] Lade P V, Duncan J M. Stree-Path Dependent Behaviour of Cohesionless Soil[J]. *Proc. ASCE*, 1976, 102(GT1): 42-48.
- [2] Lambe T W, Marr W A. Stress Path Method[J]. *Second Edition Journal of the Getechnical Engineering Division, ASCE*. 1979, (GT6):73-81.
- [3] 温特科恩 H F,方晓阳. 基础工程手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1997.
- [4] 华东水利学院土力学教研室. 土工原理与计算[M]. 北京:水利电力出版社, 1984.
- [5] 胡中雄. 土力学与环境土力学[M]. 上海:同济大学出版社, 1997.