

粘土的压密状态及其力学性质*

李作勤

Study of Compacted State and mechanical Behaviour of Clays

Li Zuo-qin

Abstract

This paper discusses in detail compacted states of common clay (the effect of the structural strength can be negligible) and clay possessing structural strength, the physical essence of preconsolidation pressure is distinguished from that of structural yield pressure. The difference between them is demonstrated. It is pointed out that improper interpretation their difference may cause troubles in analysing compactibility of clays and evaluating their mechanical properties.

The relationship among structural strength, compactibility, and shear strength of clays is discussed, and some phenomena of pore-water pressure change are presented.

提 要

本文首先较详细地讨论了一般粘土(“结构强度”的影响可以忽略)和有“结构强度”粘土的压密状态,区分先期固结压力和结构屈服压力不同的物理实质,澄清二者之间的差别并指出混淆这种差别可能引起对土的压密状态的分析 and 力学性质的估计的错误。

其次,讨论了土的结构强度、压密状态和压密性质之间的关系。

最后,讨论了土的结构强度、压密状态和抗剪强度的关系,揭示了孔隙水压力变化的规律。

引 论

粘土的压密状态与其力学性质密切相关。因此,土的压密状态的研究日益引起人们的重视。长期以来,人们习惯于把室内压密曲线和固结不排水剪切强度包线的拐弯处的

* 本文部份试验是陈大猷同志协助完成的,特此致谢。

压力作为确定先期固结压力的一种方法^[1]。可是,常常可以见到这样的土类,用这种方法确定的“先期固结压力”比土的目前自重重大得多,应定义为超压密粘土。然而,从地质历史的观点分析,该土层并没有受过比现在大得多的固结压力。同时,土的密度不大,孔隙比甚至大于目前自重压力下正常压密状态的孔隙比,它应定义为欠压密土。要解决这个矛盾,笔者认为,必须深入研究粘土由于“结构强度”的出现对压密状态的影响,从而区分“先期固结压力”和“结构屈服压力”的不同物理概念,建立“先期固结压力”的正确概念,才能准确地判定土的压密状态并估计其力学性质。倘若不加分析地用上述曲线的拐弯点作为判定依据,很自然地会把具有结构强度的欠压密土或正常压密土误认为超压密土或重超压密土。这种误解,可能引起对土的力学性质的错误估计,从而给工程建筑物带来不应有的麻烦或事故。因此,对粘土的压密状态与其力学性质的关系必须进一步深入地研究。

一、粘土的压密状态

自然界中粘土所处的压密状态一般区分为正常压密、超压密和欠压密三种。当把土调成液限稠度的土膏并置于单向压密仪中分别以不同的压力使其固结,可以测出土的孔隙比 e 和固结压力 P 的关系曲线 e_0f (图1)。

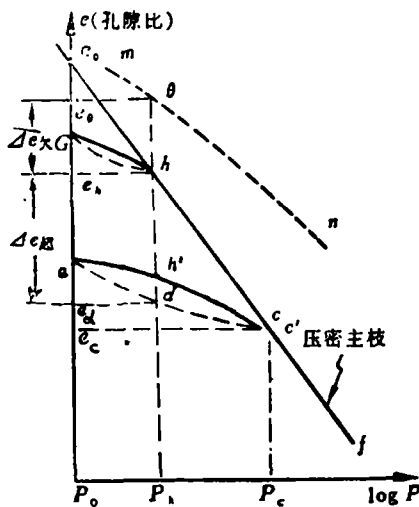


图1 三种压密状态的粘土的压密曲线

对于特定的土类,在试验条件,即物理化学条件、试样尺寸、加荷条件及试验环境等因素相同时,孔隙比 e 和压力 P 的数值是单一对应的。这时土所处的状态是稳定的,称为真平衡状态^[2], e_0f 曲线称为初始压密曲线(或压密主枝)。当粘土在历史上承受过的最大固结压力就是它目前的自重压力时,这种土叫正常压密粘土,其密度可由初始压密曲线上的与 P_h 相对应的 e_h 求出,其压密曲线由实线 Ghf 表示。可以看出,用正常压密粘土进行室内压密试验时,若压力小于自重压力,则土样处于超压密状态。若压力等于或大于自重压力,则土样处于正常压密状态。工程活动产生的附加荷载加上土层自重的共同作用,使土具有正常压密的特性,故称为正常压密粘土。

当土在压力 P_0 固结后,逐渐卸荷,然后逐渐加荷,这时孔隙比的变化远小于初始压密曲线的情况,其变化以迴环线 $cdah'f$ 表示。自然界中土体在上复压力(亦可以是其它自然营力) P_0 作用下固结后,由于种种原因(如侵蚀、冲刷、冰川消退等)上复荷载减小到目前的自重压力为 $P_h=rh$ 时,孔隙比变为 e_d ,此时它具有比正常压密更大的密度,称为超压密土。它比正常压密所超过的密度可由 $\Delta e_{超}=e_d-e_h$ 来计算。土的超压密程度可用所谓超压密比($R=\frac{P_0}{P_h}$)来度量。当 $R=1.0$ 时便是上述的正常压密;当

$R > 1.0$ 时称为超压密。超压密土的压密曲线具有 $a'h'c'f$ 的形式, P_c 就是先期固结压力。当试验压力小于 P_c 时, 土体处于超压密状态。工程活动产生的附加荷载叠加于土层自重之上, 其压密状态以 P_c 为临界点, 当总压力小于 P_c 时处于超压密状态。超过 P_c 时便进入正常压密状态。

土在自重压力 P_h 作用下, 孔隙水压力还没完全消散, 总压力没有全部转化为有效压力, 与 P_h 对应的孔隙比为 e_h , 与正常压密相比, 其密度小了一个数值 $\Delta e_h = e_0 - e_h$, 使 $R = \frac{P_c}{P_h} = \frac{P_h - u}{P_h} < 1$ 时, 这种土叫欠压密土 (象近代海淤土、新吹填土等), 其上复荷载为土骨架和孔隙水所分担, 这种没有固结完成的土其 $e - \log P$ 关系曲线 mn 位于 e_0f 之上, 此时 P 是总压力。

二、 土的结构强度、压密状态和压缩性

所谓土的“结构强度”, 是指土的固体颗粒的特定排列及其相互接触处, 由于孔隙水中析出的沉淀物 (如碳酸盐、游离铁、铝氧化物等) 引起的胶结作用等因素产生的附加强度。就胶结作用来说, 附加强度的数值与胶结物的性质、土颗粒相互排列形成的接触类型和接触点的数目有关, 即与土的结构有关。破坏了原生结构的土 (重塑土) 不存在这一强度分量。这部分强度丧失后, 经过静置一段时间之后有的是可以恢复的 (部分恢复或全部恢复), 称为触变型; 有的是不可恢复的, 称为非触变型。

图1是没有结构强度的正常压密粘土和超压密粘土的压密曲线。它们都具有拐点且都对应着真正的团结压力, 并且大致以此压力为起点。将此曲线纳入初始压密曲线 e_0f , 可是, 当粘土具有结构强度时, 其压密情况又是怎样的呢?

由于固结完成过程和结构强度形成过程在时间上的前后相互关系, 对应地存在着“结构强度”的正常压密、超压密和欠压密三种粘土。现将它们的特性分述如下。

a. 当粘土在自重压力下固结后, 由于所处的物理化学条件的变化, 出现了胶结物使土颗粒的相互接触处产生了“结构强度”。这种固结完成在前, “结构强度”产生在后的情况便形成了具有“结构强度”的正常压密粘土。其压密曲线与初始压密曲线的相对位置不再是象图1中的 Ghf 而是图2中的 $GhIJ$ 。曲线穿过初始压密曲线 e_0f , 穿过的距离决定于在抗压条件下的“结构强度” q 的数值。这类土的有效固结压力 $P_c = P_h$ 。其密度仍可由目前的自重压力 P_h 对应于初始压密曲线上的 h 点的纵坐标 e_h 求出。压密曲线上的拐点 I 对应的压力 P_k 是“临界压力”, 以它为界, 土的应力-应变

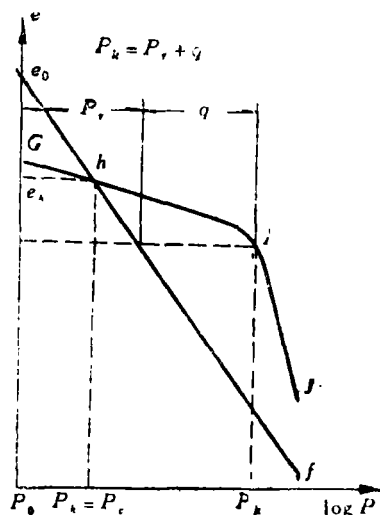


图2 具有结构强度的正常压密粘土的压密曲线

特性和强度特性在其前后都有显著的差异。当压力小于 P_k 时, 曲线坡度平缓, 变形很小, 且在一定压力范围内的变形是可以恢复的弹性变形。当压力超过 P_k 时, 由于颗粒间的联结键开始大量的破坏而使结构强度显著丧失, 变形急剧增大。因此, P_k 被定义为“结构屈服压力”, 它是由两部分组成, 即原始抗压强度 P_r (与孔隙比有关) 和抗压结构强度 q (随原生结构的逐渐破坏而逐渐丧失)。随着压力的增大, 当原生结构完全达到破坏时, 压密曲线就接近或纳入初始压密曲线; 而对曲线 $GhIJ$ 的 hIJ 段来说, 它是孔隙比与压力间的假平衡状态。

b. 当粘土在大于目前的自重压力固结完成后再进行部分卸荷至目前的自重压力 P_h 时, 这就与上述情况相同, 当固结完成在前, 产生“结构强度”在后 (与卸荷前后无关) 便形成了具有“结构强度”的超压密粘土, 其压密曲线不是图1中的 $ah'c'f$, 而是图3中的 $G'h'I'J'$, 土的“先期固结压力”是 P_c , 而不是曲线上拐弯点的“结构屈服压力” P_k , P_k 前后土的变形特性和有“结构强度”的正常压密粘土有些类同。

c. 当粘土的结构强度形成的速率较快, 以至于土骨架不需进一步压密便能承受整个上复盖层的荷载。在自重压力下的孔隙比 e_m 比正常压密状态大一个数值 $\Delta e_{\text{欠}} = e_m - e_h$ (图4), 此时土处于欠压密状态, 可是上复荷载却全为土骨架所承担, 孔隙水不存在

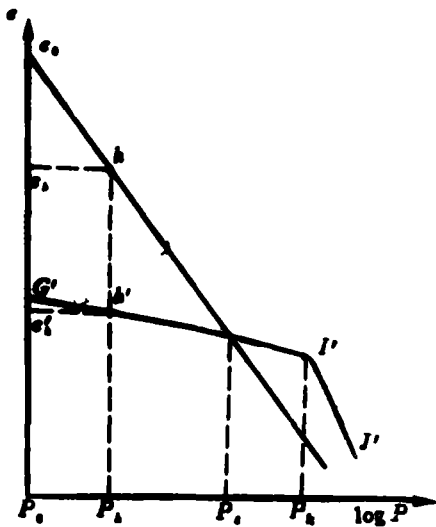


图3 具有结构强度的超压密粘土的压密曲线

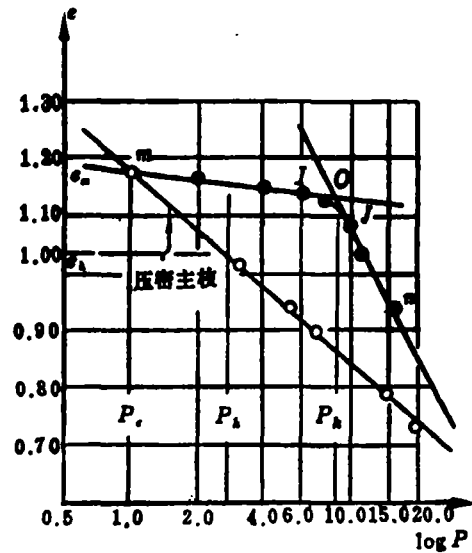


图4 有结构强度的欠压密土的压密曲线

超静水压力, 这种土叫做有“结构强度”的欠压密粘土。在压力小于土的“结构屈服压力” P_k 时, 其力学性质与超压密土有些类同, 因而也有人称为“表观超压密粘土” (Apparented over-consolidated clay)。这种叫法是否恰当还值得商榷。但是必须指出, 当压力超过 P_k 之后, “结构强度”逐渐丧失, 其力学性质却与超压密土有很大差异。例如处于超压密状态的土, 当“结构强度”减小或完全丧失后, 即使压力不变, 它也会发生膨胀。有“结构强度”的欠压密土, 在这种情况下其体积则会缩小。因此, 对于这类土, 不能简单地用压密曲线上 mn 的拐弯点 O 所对应的“结构屈服压力”(P_k)大于自

重压力(P_n)来判定为超压密土;而应该以初始压密曲线 e_0f 与压密曲线 mn 的交点所对应的固结压力 P_c 来判定它是有“结构强度”的欠压密土。笔者认为,象某些灵敏粘土、具有湿陷性的类黄土、海洋中的一些粘土、工程建筑遇到的其物理指标($r_d, \omega \cdots$)甚差,而力学指标(τ, E)颇高(一定压力范围)的特殊土类,均属于此类土的范围。

综上所述,要判定土的压密状态,必须以初始压密曲线为标准。即用压密曲线与初始压密曲线的交点处所对应的压力作为先期固结压力 P_c 来计算超压密比,而后根据超压密比进行判断。既然是以初始压密曲线为准绳,而曲线上的每一点的孔隙比所对应的压力都是固结完成后的有效压力。在这里有待于进一步研究的问题是,固结过程包括相互渗透的主固结和次固结两种过程。主固结是以孔隙超静水压力完全消散为其终结,由此可以找出初始压密曲线 e_0f 。同时,依据不同的次固结程度,也可以相应地找出含有不同次固结时间 $t_1, t_2 \cdots t_n$ 的初始压密曲线 $e_0t_1, e_0t_2 \cdots e_0t_n$ (图5)。究竟采用什么固结标准最为合适,这个问题还有待进一步深入探究,但是从实用着眼,笔者初步认为采用曲线 e_0f 是合适的。其理由是:按照L·贝伦^[3]对粘土的分类,把正常固结粘土细分为“新的正常固结粘土”和“老的正常固结粘土”。新的正常固结粘土是超静水孔隙压力完全消散但未出现次固结,初始压密曲线用 e_0f 表示(图5)。对于经受过次固结作用的老的正常固结粘土,其初始压密曲线假定为 e_0t_n 。这样,在压力 P_2 作用下,对于“新的”,其平衡的孔隙比是 e_1 ;而对于“老的”,其平衡孔隙比则是 e_2 。当孔隙比为 e_1 时,对于“新的”来说,其固结压力应该是 P_2 ,而对于“老的”来说,其固结压力却是 P_1 ,两者相差 $\Delta P = P_2 - P_1$ 。若采用曲线 e_0f 作标准,不区分“新”与“老”,一律以“新的”作标准,就会把老的正常固结粘土的固结压力人为地提高一个数值 ΔP ,而把它定义为超压密粘土。这样,会不会产生上述讨论过的麻烦呢?否,这种老的正常固结粘土具有超压密土的力学性质,把它判定为超压密粘土在工程建筑的应用中是可行的。这类超压密被人们称为准超压密。

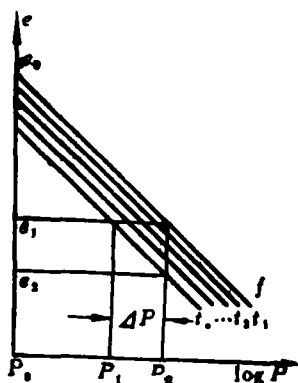


图5 不同次固结度的初始压密曲线

诚然,寻找精确的先期固结压力是一个极其复杂的问题。就以时间因素的影响来说,除了试验之外,还要结合地质的应力历史进行综合分析。如一般粘土的孔隙比 e 和压力 P 有下述的关系:

$$\Delta e = C_c \log \frac{P_0 + \Delta P}{P_0} \quad (1)$$

式中 C_c ——粘土的压密指数

又若次固结引起的变形符合布衣斯曼提出的时间对数定律:

$$\Delta e = C_a \log \frac{t_0 + t}{t_0} \quad (2)$$

式中 $C_a = HP(1 + e_0)\alpha$, 而 α 是一时间对数周期单位应力引起的次固结应变量。

从上述关系可以看出,压力增量 ΔP 可引起压密量 Δe ,次固结时间也可产生压密增

量 Δe 。在这方面,二者是等效的。若令(1)=(2),可获得

$$\frac{t_0+t}{t_0} = \left(\frac{P_0 + \Delta P}{P_0} \right)^{C_c/C_a} \quad (3)$$

由试验测出参数 C_c, C_a 和渗透固结终止时间 t_0 ,压密曲线的拐弯点对应的表观先期固结压力“ $P_c = P_0 + \Delta P$ ”,便可确定次固结时间 t 。若知道次固结时间 t ,便可找出真正的先期固结压力 P_c 。事实上,天然土层的次固结时间是很难准确确定的。

其次,在测定初始压密曲线 e_0-f 时,还必须注意保持原状土样的含水量,因为原状土样和风干土样分别调成具有液限稠度的土膏,测出的 e_0-f 曲线有很大的差别。

最后,对于重塑土来说,胶结物的出现改变土的性状,工程活动是对于形成了胶结物之后,因此测定 e_0-f 曲线时,不必除去胶结物。只有当胶结物是可溶盐时,加上工程建筑引起水文地质条件变化,在工程建筑物使用期间内会将可溶盐溶滤,这时,在测定 e_0-f 曲线以及研究其力学性质时,有必要考虑洗盐的问题。当然,在研究胶结物的种类、性质、作用时,对胶结物作必要的处理,那是另一类问题,不必赘述。

有结构强度的土,“临界压力”不是“先期固结压力”,而是“结构屈服压力”。怎样确定这一对工程建筑富有意义的指标呢?笔者认为,由于结构强度的存在,土的卸荷回弹对压密变形的影响很小,在一定的压力范围内,反复加荷产生的变形甚至可以是纯弹性的,压密曲线的拐弯处,曲率半径较小,拐点明显易定,不象无结构强度的土类,卸荷影响较大(图1中的C和C'的差异),曲率半径较大,因而“先期固结压力”确定比较麻烦。对于具有结构强度的土类,其“结构屈服压力” P_k 的确定,只需将压密曲线具有最小曲率半径处的两边近乎直线段 mI 和 Jn 延长相交于O, O点的对应的横坐标即为所求的 P_k 值(图4)。当压力达到 P_k 时,意味着土体中颗粒间有大量的联结键被屈服而进入极限平衡状态。

三、土的结构强度、压密状态和抗剪特性

图6表示高压三轴仪固结不排水剪切的试验结果。粘土的压密主枝 e_0-f 对应着剪切主枝 oF ;超压密粘土的压密曲线 abf 对应着剪切强度包线 ABF 。可以看出,当压力超过“先期固结压力” P_c 之后,压密曲线纳入压密主枝,剪切强度包线也纳入剪切主枝,具有结构强度的欠压密粘土的压密曲线为 mIn ,其对应的剪切强度包线为 MN 。这类土,当固结压力小于“结构屈服压力” P_k 时,密度没有显著地随固结压力的增大而增大,但粒间的有效应力却相应增大,剪切强度跟随增大。当固结压力超过 P_k 时,土的结构强度逐渐破坏丧失,但密度也逐渐增大,剪切强度的变化由“消”“长”两方面因素所决定,而不象超压密土只有“长”的因素而纳入剪切主枝。图中的曲线 MN 是本试验用的一种土料的试验结果。土的结构屈服压力为 8kg/cm^2 左右,当固结压力超过了 8kg/cm^2 之后,土体密度增大引起剪切强度增长的因素超过结构强度破坏引起剪切强度减小的因素。因此,总的剪切强度随固结压力的不断增大而提高。

关于孔隙压力的变化情况,我们用压力增量固结和加压来测定孔隙水压力系数

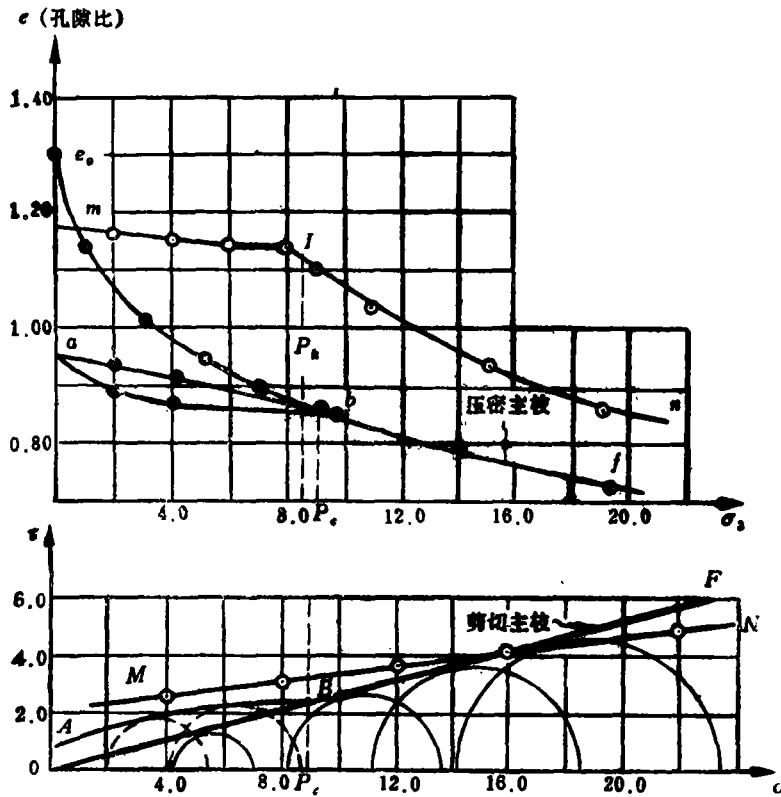
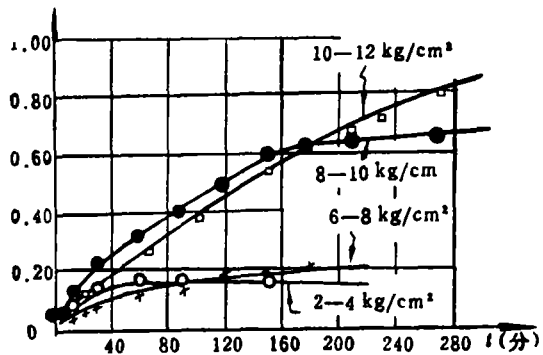


图6 土在固结不排水条件下的抗剪强度与压密状态和结构强度的关系

$B = \Delta u / \Delta \sigma_3$ 。操作方法是: 试样在围压为 2 kg/cm^2 固结完成后, 施加围压增量 $\Delta \sigma_3 = 2 \text{ kg/cm}^2$ ($2-4 \text{ kg/cm}^2$), 测出 B 值与时间的关系。 B 值接近稳定之后, 进行排水固结, 然后再加压测量, 逐级递增, 其结果如图 7 所示。试验表明: 当围压小于“结构屈服压力” P_k 时, B 值变化较小, 其数值大约为 0.20 左右; 当围压超过 P_k 值之后, B 值急剧增大到 0.65 以上。这与正常压密状态的粘土有显著的差别, 正常压密土的 B 值随固结压力水平的提高, B 值逐渐减小。图 8 为相同土类重塑制备的正常压密土样试验的结果。 B 值从起始接近 1.0, 随固结压力水平的提高而减小至固结压力为 7.0 kg/cm^2 的时的 0.26。固结压力水平越高, B 值越小。

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3}$$

图7 具有结构强度的欠压密土, 压力增量引起孔隙压力系数 B 值的变化

对于先期固结压力 $P_c = 8.0 \text{ kg/cm}^2$ 的超压密土样, B 值的变化与有结构强度的欠压密土有些类同, 但数值相差甚大(图 9)。当固压小于 P_c 的范围时, B 值随围压的增大

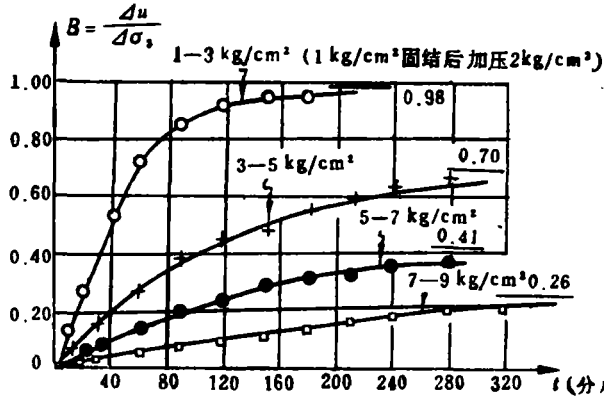


图8 正常压密粘土在前级压力固结后压力增量引起孔隙水压力系数 B 的数值

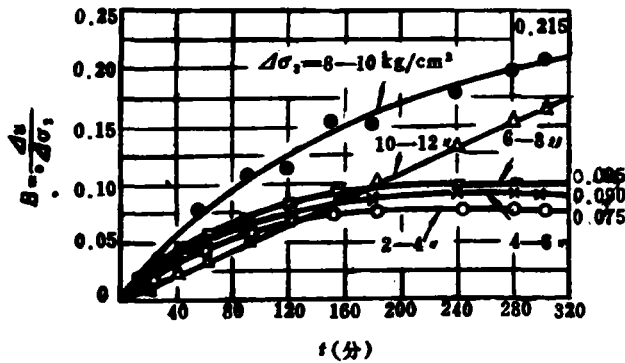


图9 超压密粘土压力增量引起孔隙水压力系数 B 值的变化

略有增大，最大值为0.20左右；当围压超过 P_c 时， B 值的变化纳入正常压密土的变化规律，起初有些增大，然后逐级递减，其最大值不超过0.26。这就是有结构强度的欠压密土、正常压密土和超压密土的 B 值所具有的不同变化规律。

固结不排水条件下剪切破坏时孔隙水压力系数 A_f 的数值，对于不同压密状态的土，其变化规律如图10所示。

有结构强度的欠压密土，在围压 σ_3 较小时，施加偏差应力并未能显著破坏土的结构强度，剪损面的厚度较薄，引起附加的孔隙水压力较小， A_f 也较小。随着固压的增大，施加偏差应力时引起结构强度破坏也增强， A_f 值也逐渐增大。当围压 σ_3 接近和跨过 P_k 时，偏差应力引起结构强度的破坏急剧增强， A_f 的最大值可达0.90。通过了最大值，随着 σ_3 进一步增大，结构强度在固结过程已大量破坏，土体的密度状态逐渐接近于正常压密状态，因而施加偏差应力时， A_f 逐渐减小。

先期固结压力为 8 kg/cm^2 左右的土样，其 A_f 数值的变化也有上述类似的规律，但数值相差很大，最大值只有0.24左右。这种差异对工程建筑物来说，影响很大，因此上述两种土不能混为一谈。

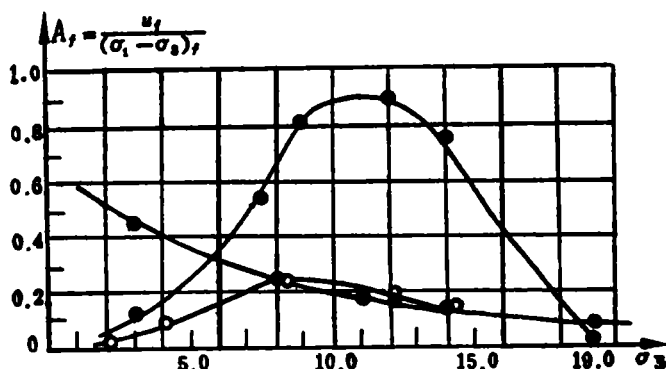


图10 高压三轴仪中国结不排水条件下剪切破坏时孔隙水压力系数 A_f 与围压 σ_3 的关系

- 表示具有结构强度($P_k=8.3/\text{kg}/\text{cm}^2$)的欠压密粘土 $P_h=2.80\text{kg}/\text{cm}^2$, $P_c=1.0\text{kg}/\text{cm}^2$ 左右);
- 表示重塑地正常压密土样;
- 表示先期固结压力为 $8.40\text{kg}/\text{cm}^2$ 的土样。

正常压密土的 A_f 值随固结压力的增大而单调递减。

结 语

1. 粘土的“先期固结压力”和“结构屈服压力”具有不同的物理概念,不能混淆。压密状态的判别,原则上应以密度为标准,倘若采用受力强度标准,有时会产生错误。只有当粘土不存在上述定义的结构强度时,这二种判别标准才是一致的。

2. 粘土的压密状态与其力学性质密切相关,必须深入研究,全面分析,不能简单地把压密曲线拐弯点处的压力作为“先期固结压力”,因为这样有可能把有结构强度的欠压密土,误认为超压密土。

3. 有结构强度的欠压密土,当外荷引起的组合压力超过其“结构屈服压力” P_k 时,欠压密的力学性质便显露出来,工程建筑设计时要特别注意这种特性所带来的问题。

参 考 文 献

- (1) Casagrandes, A., The Determination of the Preconsolidation Load and Its Practical Singnificance, Proc. 1st Inter. Conf. on Soil Mech. a. Foun. Engi., Cambridge, Mass, June, 1936, Vol. 3, P. 60-64.
- (2) H. Я. 杰尼索夫, 粘性土的工程性质, 盛崇文译, 1960年, 第102—106页。
- (3) Norway, Bjerrum, L., Problems of Soil Mechanics and Construction on Soft Clays and Structurally Unstable soil (Collapsible, Expansive and Others), Proc. of 8th I.C.O.S.M.F.E. Vol. 3, P. 114—117.
- (4) Skempton, A.W., The Pore Pressure Coefficients A and B, Geotechnique, 1954, Vol. 4, P. 143—147.