

## 基于三轴试验的水-土压力计算

王保光<sup>1,2</sup>, 沈雪<sup>3</sup>, 沈扬<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学 岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 3. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 支挡结构物设计时水-土压力的计算方法一直存在争议, 分算方法理论机理明确, 但孔压难以实测, 合算方法适应某些工况, 但机理不明。针对运营期内支挡结构物后填土表面短时间施加临时荷载的特殊工况, 根据室内三轴 UU 试验和 CU 试验间内在联系, 提出了通过 CU 强度包线判定不排水条件下土体所处状态的方法, 利用 CU 强度包线得出骤加荷载时主应力和超孔压计算公式, 为特殊工况下支挡结构物上水-土压力计算提供一种新的探讨思路。

**关键词:** 水-土分算; 水-土合算; 孔隙水压力; 水-土压力; 三轴试验

中图分类号: TU432

文献标识码: A

## The calculation of soil - water pressure based on triaxial Test

WANG Bao - guang<sup>1, 2</sup>, SHEN Xue<sup>3</sup>, SHEN Yang<sup>1, 2</sup>

(1. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Jiangsu Nanjing 210098, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Jiangsu Nanjing 210098, China  
3. College of civil engineering and transportation, Hohai University, Jiangsu Nanjing 210098, China)

**Abstract:** There has been controversy on the calculation method of soil - water pressure in the design of the supporting structure. There are two methods to calculate soil - water pressure, soil - water pressure calculated separately and soil - water pressure calculated jointly. The theoretical mechanism of the former is very clear and definite, but pore pressure is difficult to measure. The latter can be suitably applied to some engineering, but the theoretical mechanism is not clear and definite. There is a special condition in retaining structures during operation period, temporary load is imposed on the surface of the soil. For the special condition, according to the CU strength envelope the method of determining the soil's state under the condition of undrained condition. It is based on the intrinsic connection between unconsolidated undrained triaxial tests and consolidated undrained triaxial tests. The principal stress and the excess pore pressure are calculated which are caused by the increase of load, it is based on the CU strength envelope. A new approach is provided on the calculation of soil - water pressure for retaining structures under special conditions.

**Key words:** separate calculation; joint calculation; pore pressure; soil - water pressure; triaxial test

在计算支挡结构上水-土压力时, 分算法与合算法的采用一直存在争议<sup>[1-5]</sup>。基于有效应力原理的水土分算把作用在支挡结构物上的水压力和土压力分开进行计算, 其理论机理清晰明了, 主要应用于强透水性土质, 但对于某些渗透性差且孔压难以测定的土质, 基于此计算的孔压往往比真实值大。虽然直接采用饱和重度进行计算的水

土合算法在某些工况下的计算结果与实测值接近, 但其理论机理却存在缺陷, 工程应用时不免存在隐患。故而, 在目前的工程设计中, 通常只能根据长期的工程经验来选用水土分算法或水土合算法, 支挡结构物上水土压力的计算至今仍是工程界的一大难题。本文针对运营期内支挡结构物后填土表面短时间施加临时荷载的特殊工况, 通过

CU 强度包线判定不排水条件下土体所处状态的方法,为特殊工况下支挡结构物上水-土压力计算提供一种新的探讨思路。

## 1 水-土压力计算方法分析

支挡结构物上水土压力的计算是挡土墙、基坑开挖等工程中的重要设计依据。对于砂质粉土、砂土和碎石土等强透水性土质,假设土体中颗粒是散碎的,且孔隙水完全水力连通,基于有效应力原理,宜采用有效应力法来描述土体强度,水、土压力计算采用水土分算法。在《建筑基坑支护技术规程》中也有明确规定<sup>[6]</sup>:对地下水位以下的砂质粉土、砂土和碎石土,应采用土压力和水压力分算方法,水压力按静水压力计算(若存在渗流,应按渗流理论计算水压力和竖向有效应力,本节所讨论的孔压均是在静水条件之下,不考虑渗流等其他因素引起的超孔压),抗剪强度指标应采用有效应力强度指标。

然而对弱透水性的土质,土颗粒表面存在结合水,土体孔隙中的水并非完全水力连通,若按静水压力模式计算孔压,其结果将不准确,且某些工程现场的真实孔压又难以准确测定。故而一些学者们采取避免孔隙水压力的方式而选择了总应力法来计算水、土压力。而在基于总应力法计算水、土压力时,水、土压力的计算原则却出现了水、土分算和水、土合算两种观点。

坚持水土合算的学者们认为既然避免了孔压估计的难题,就应将水和土粒作为整体即土体进行考虑,直接采用土体饱和重度计算地下水位以下的水土压力。在某些工况下水土合算的结果却与实测接近。因此,基于现有理论研究和大量工程经验,《建筑基坑支护技术规程》规定:对地下水位以下的黏性土、黏质粉土可采用水土合算法,对正常固结和超固结土,土的抗剪强度指标应采用三轴 CU 指标或直剪固快指标,对欠固结土,宜采用有效自重应力下预压固结的三轴 UU 指标。

坚持水土分算的学者们则始终认为:基于有效应力原理,土体强度由其截面上的法向有效应力决定,土骨架和孔隙水应分开考虑,单独考虑静水压力的影响,将剪切破坏时引起的超静水孔的影响考虑在总应力抗剪强度指标中,采用固结不排水总应力强度指标弥补超静孔压损失。这种分算方法,虽理论机理明确,但孔压计算结果却往往较实测值大,如若用于实际建设,工程成本偏大。

有些学者提出总应力水土分算法的孔压计算模式可能存在问题,需要对分算法的孔压计算模式改进,简言之即:土中水并非“水中水”。对于砂质粉土、砂土和碎石土等强透水性土质,孔隙水完全水力连通,孔压可按“水中水”计算。而对于弱透水性软黏土,土颗粒表面存在结合水,水土间存在相互作用,其孔压分布形式并非类似“水中水”所示规律,黏性土中的水并非全部为“水中水”。此外,有些学者正在研究水土分算合算的统一方法,考虑水土相互作用的各种影响因素,进而引入相关水压力系数,最终建立水土分算、合算的统一计算模型<sup>[7]</sup>。

## 2 基于三轴试验的孔隙水压力计算

运营期内支挡结构物会面临某些特殊工况,例如:穿越土坡的高速公路路堑段,通常会设置挡土结构(如图1所示),若坡顶发生滑坡或其他受荷情况等会导致墙后土体表面突然受荷,上述工况可简化为:对于安全稳定的挡土结构,假设墙后填土表面受到快速施加荷载 P 的作用,地下水位下土体因超载引起的超孔压短时间内无法消散,且现有技术无法准确测定其超孔压。鉴于此类特殊工况,本文基于有效应力原理和三轴试验间的内在联系,对支挡结构物安全性的验证以及若达到极限状态时的孔隙水压力计算予以了详细分析。

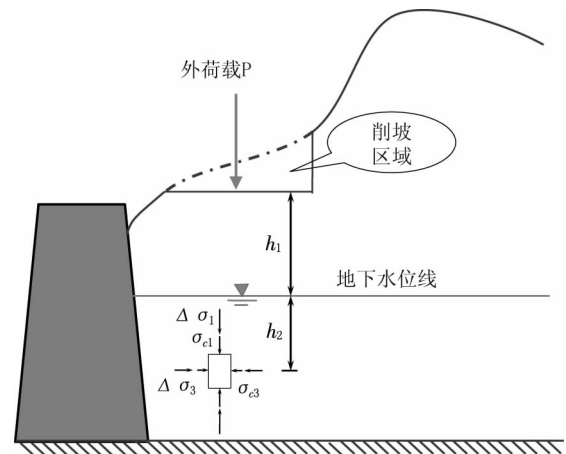


图1 运营期内作用瞬时荷载的挡土结构

Fig. 1 The earth retaining structure of instantaneous load during operation

图1所示不排水工况下,现有技术条件可能无法准确测量由于 P 引起的超静孔压,故只能采用总应力法进行计算挡土墙上的土压力。室内试验近似的加载路径为三轴 UU 试验,然而 UU 试验只能得到某一应力状态下地基土体的不排水强度,无法得到相应的强度指标,不易判定上述工况

下墙后任意点处土体所处状态。而室内 CU 试验虽不能与实际应力条件完全匹配,但能测定土体总应力和有效应力强度指标,由相应指标可推求土体强度,并且由于 UU 试验和 CU 试验间存在相互联系,我们可以借用 CU 强度指标来推求不排水工况下的土体强度,判定上述工况下的土体应力状态,进而计算极限状态下的土压力。

### 2.1 CU 强度指标应用条件

在使用 CU 强度指标时,一些人员建议采用如下方法:例如图 1 所示的  $K_0$  固结状态的挡土墙填土中某一位置处,土单元体竖向和水平向初始固结应力分别为  $\sigma_{c1}$  和  $\sigma_{c3}$ ,土体表面施加附加荷载  $P$  引起该点处土单元体的竖向和水平向附加总应力为  $\Delta\sigma_1$  和  $\Delta\sigma_3$ ,根据 CU 总应力强度包线,直接采用总小主应力  $\sigma_3 = \sigma_{c3} + \Delta\sigma_3$  来计算极大主应力,获得如图 2 中所示的莫尔圆  $B$ ,将计算得到的极大主应力  $\sigma_{1B}$  与竖向应力  $\sigma_{c1} + \Delta\sigma_1$  进行比较,若结果  $\sigma_{1B} > \sigma_{c1} + \Delta\sigma_1$ ,便认为加荷后该点土体仍处于安全状态。

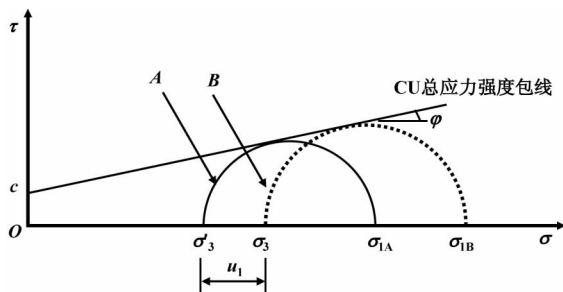


图2 CU条件下极限主应力的计算

Fig.2 Calculation of the ultimate stress of CU

然而上述方法却是错误的, CU 试验中土体剪切前一直处于排水状态,即为有效应力状态。因此,使用 CU 强度包线判别土体应力状态时,剪切前小主应力必须为有效应力,如图 2 所示,若直接采用莫尔圆  $B$  的小主应力  $\sigma_3$  (其中包含了孔隙水压力),将夸大土体的极大主应力( $\sigma_{1B} > \sigma_{1A}$ )。正确的算法应是明晰剪切前的有效小主应力,即扣除  $\sigma_3$  产生的孔压得到如图 2 中莫尔圆  $A$  的小主应力  $\sigma$  (剪切前的有效应力),再根据 CU 总应力强度包线计算得到莫尔圆  $A$  的极大主应力  $\sigma_{1A}$ ,依此极限应力与现实条件中的大主应力进行比较,才能得到破坏与否的正确结果。实际工程中,剪切前的有效应力并不能直接得到,但可通过 UU 试验和 CU 试验间存在的本质联系,确定剪切前的有效小主应力,进而求出极限状态大主应力值。

### 2.2 UU 试验和 CU 试验间联系

现实中对天然固结状态下的土体快速施加外荷载,那么短时间不排水条件下地基中某一深度处的土单元体就会在竖向和水平向同时增加附加应力,这一应力状态变化过程就相当于在 UU 试验中完成初始固结后,在某一级围压增量下施加轴向附加应力进行剪切。对于某一初始固结应力下的土体进行 UU 试验时,施加的围压增量  $\Delta\sigma_3$  均由孔隙水承担,土体的有效应力状态始终不变,有效莫尔圆唯一存在。于是 UU 试验中,由以  $\sigma_c$  为初始固结应力的一组总应力极限莫尔圆所得到的不排水强度,便可等效为在  $\sigma_c$  作用下直接施加轴向附加应力增量  $q$  进行不排水剪所得到的土体强度。

依据此等效,如图 3 所示,如果要在 CU 试验体系下评价不排水条件下土单元体莫尔圆  $A$  所处状态,应将该圆小主应力  $\sigma_{A3}$  扣除围压增量  $\Delta\sigma_3$ ,方能作为 CU 试验中剪切前的有效应力  $\sigma_3$  (即 CU 固结阶段施加的应力和)。然后再以  $\sigma_3$  为小主应力,根据强度极限定律作出与 CU 总应力强度包线相切的极限莫尔圆  $B$ ,将莫尔圆  $B$  的大主应力  $\sigma_{B1}$  与实际中莫尔圆  $A$  扣除围压增量后得到莫尔圆  $C$  的大主应力  $\sigma_{C1} = \sigma_{A1} - \Delta\sigma_3$  进行比较,以二者间大小关系方可判别莫尔圆  $A$  所处应力状态是否稳定。

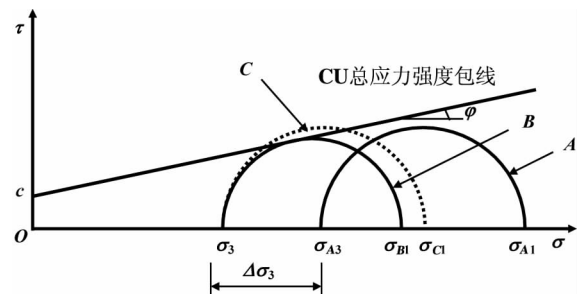


图3 运营期内作用瞬时荷载的挡土结构

Fig.3 CU strength envelope discrimination method for the stress state of the undraining soil element

从图 3 可见,  $\Delta\sigma_{C1} > \sigma_{B1}$ , 那么被分析的应力状态则是一种破坏状态,但如果直接将莫尔圆  $A$  与 CU 总应力强度比较,将会得到该应力状态属于稳定状态的错误判断。

### 2.3 土体极限状态判定及孔压计算

基于 UU、CU 莫尔圆间的转换原理,采用 CU 总应力强度包线判别现实中不排水条件下土单元体是否将处于极限应力状态。对于图 1 中所述特

殊工况,施加附加荷载后地基中某处单元体的应力状态如图1所示,土单元体在 $\sigma_{c1}$ 和 $\sigma_{c3}$ 作用下偏压固结至稳定,可表示为图4中的莫尔圆C。

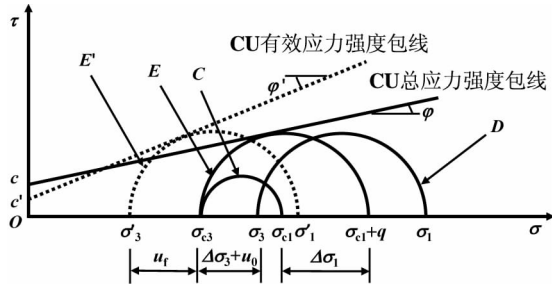


图4 UU试验莫尔圆转换为CU试验莫尔圆

Fig.4 the UU test is converted to CU test

施加外荷载后,土单元体竖向和水平向附加总应力分别为 $\Delta\sigma_1$ 和 $\Delta\sigma_3$ 单元体的总应力状态应为: $\sigma_1 = \sigma_{c1} + \Delta\sigma_1 + u_0$ , $\sigma_3 = \sigma_{c3} + \Delta\sigma_3 + u_0$ ( $u_0$ 为静水压力),即图4中莫尔圆D。扣除附加围压增量 $\Delta\sigma_3$ 和静水压力 $u_0$ 后得到的莫尔圆E,比较莫尔圆E与CU总应力强度包线的关系,方可判别土单元体在 $\sigma_1$ 、 $\sigma_3$ 作用下是否破坏。

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) + 2c \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) \quad (1)$$

比较莫尔圆E的大主应力 $E_1 = \sigma_{c1} + q$ 与 $\sigma_{1f}$ 的关系,若 $\sigma_{1f} = \sigma_{E1}$ ,即土单元体处于极限状态;若 $\sigma_{1f} > \sigma_{E1}$ ,即土单元体处于稳定状态;若 $\sigma_{1f} < \sigma_{E1}$ ,表明土体早已破坏(实际中不会出现这种关系)。

若土单元体处于极限状态,虽现有测量技术无法准确测定此种短时间施加附加应力的工况所引起的超孔压,但根据室内测定的有效应力强度包线可以计算出该超孔压 $u_f$ (如图4所示),即从已知的总应力指标 $c$ 、 $\varphi$ 、有效应力值标 $c'$ 、 $\varphi'$ 和莫尔圆E的大小主应力,推求 $u_f$ 为:

$$u_f = M\sigma_{c3} + C \quad (2)$$

式中: $u_f$ 为附加荷载引起的超孔压; $\sigma_{c3}$ 为初始固结时的小主应力; $M$ 、 $C$ 为计算系数

$$M = \left[ \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) - \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi'}{2}\right) \right] /$$

$$\left[ 1 - \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi'}{2}\right) \right]$$

$$C = \left[ 2c \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) - 2c' \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi'}{2}\right) \right] /$$

$$\left[ 1 - \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi'}{2}\right) \right]$$

根据莫尔圆D的总应力状态和式(8~11)计算得出的超孔压即可以计算附加应力作用后土单元体的总孔压 $u$ 及有效大、小主应力 $\sigma_1'$ 、 $\sigma_3'$ ,计算公式

分别如式(9~11)所示:

$$u = \Delta\sigma_3 + u_f + u_0 \quad (3)$$

$$\sigma_3' = \sigma_{c3} + \Delta\sigma_3 - (\Delta\sigma_3 + u_f) \quad (4)$$

$$\sigma_1' = \sigma_{c1} + \Delta\sigma_1 - (\Delta\sigma_3 + u_f) \quad (5)$$

在附加外荷载作用下地基中某一单元体水平和竖向应力增量为已知条件下,上述分析基于有效应力原理和不同三轴试验间的内在联系,以一种新的视角分析了本节所述特殊工况下墙后土体的稳定型,并计算外荷载引起的超孔隙水压力。

### 3 结论

1)应用CU强度包线判定土体极限状态时,需要明晰剪切前的有效小主应力,再根据CU总应力强度包线计算得到极限大主应力,依此极限应力与现实条件中的大主应力进行比较。

2)对于某一初始固结应力下的土体进行UU试验时,土体的有效应力状态始终不变,有效莫尔圆唯一存在。由以 $\sigma_c$ 为初始固结应力的一组总应力极限莫尔圆所得到的不排水强度,可等效为在 $\sigma_c$ 作用下直接施加轴向附加应力增量 $q$ 进行不排水剪CU试验所得到的土体强度。

3)依据UU试验与CU试验间内在联系,提出了本文所述特殊工况下极限状态时有效主应力计算公式:

$$\sigma_3' = \sigma_{c3} + \Delta\sigma_3 - (\Delta\sigma_3 + u_f)$$

$$\sigma_1' = \sigma_{c1} + \Delta\sigma_1 - (\Delta\sigma_3 + u_f)$$

孔压计算公式: $u = \Delta\sigma_3 + u_f + u_0$ ,为水土压力计算提供了前提条件。

### 参考文献:

[1]魏汝龙.总应力法计算土压力的几个问题[J].岩土工程学报,1995,17(6):120-125.  
 [2]杨晓军,龚晓南.基坑开挖中考虑水压力的土压力计算[J].土木工程学报,1997,30(4):58-62.  
 [3]李广信.基坑支护结构上水土压力的分算与合算[J].岩土工程学报,2000,22(3):348-352.  
 [4]陈愈炯,温彦锋.基坑支护结构上的水土压力[J].岩土工程学报,1999,21(2):139-143.  
 [5]陈愈炯.对“基坑开挖中考虑水平压力的土压力计算”一文的讨论[J].土木工程学报,1998,31(4):74-79.  
 [6]JGJ120-2012,建筑基坑支护技术规程[S].  
 [7]王洪新.水土压力统一计算理论的证明及水土共同作用下的压力计算[J].岩石力学与工程学报,2012,31(2):392-398.

(特约编辑 李 军)