土力学中的渗透力与超静孔隙水压力

李广信[1]，李学梅[2]
（1. 清华大学水利水电工程系，北京 100084；2. 北京市第三建筑工程有限公司，北京 100044）

1 渗透力

2008年10期陈津民先生的“土中渗透力的定义和论证”[1]一文（以下简称“陈文”）所指的渗透力不只是水流对土颗粒的切向作用力，也包括其对颗粒的部分法向水压力，是正确的，在概念上也是很重要的。

这样，文献[2]中的图2-22应当画成如图1的形式。其中J为对该颗粒的渗透力，T为颗粒上的浮力。由于沿渗流方向的水压力减小，渗透力包括了水的法向压力在渗流方向的分力之差和切向拖曳力在渗流方向的分力。而浮力等于颗粒表面对应于位置水头的水压力合力（也就是颗粒所排除那部分水的重量）。

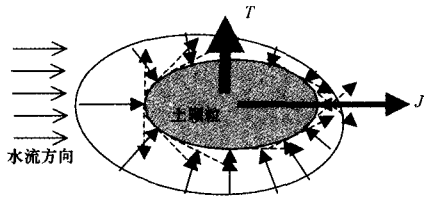


图1 渗透力示意图

这样，渗透力是水作用于土骨架上的推动力和拖曳力，其反作用力是土骨架对于渗透水流的阻力。

2 静孔隙水压力

在陈文中，将法向水压力分解为两部分：静水压与超静水压，其中静水压产生浮力，并且定义静水压为：$u_1=\gamma_w z$，其中z是相对于某一基准线（陈文称为“零静水压的参考点”）的竖向距离。从陈文的图2看，作者显然是将位置水头（或者重力势）与压力水头（或者压力势）混淆了。

图2中，当基准面选为O-O时，作用于静水下物体A上任一点的静水压力为$u_1=\gamma_w z$；如果基准面选为O′-O′（陈文中讲“零静水压的参考点”可以是“任选”的），则物体A上任一点的静水压力变为$u_1=\gamma_w z'$，而按照陈文，出现了超静水压$u_2=u-u_1=\gamma_w(h+z')-\gamma_w z'=\gamma_w h$，在静水中竟然出现了超静水压力，显然不对了。如果将参考点选在O′-O′以下，在静水中还会出现负的“静水压力”，这更不合常理。

问题在于，在复杂的水力条件下，不存在，也难以确定一个统一的“零静水压的参考点”。图2中的$-z$是该点相对于O-O基准线的位置水头，$-\gamma_w z$是其重力势。所以在前文中笔者讲：“浮力的数值等于颗粒表面对应于位置水头的水压力的合力”，或者说是对应于重力势的水压力合力。在图2中的静水中，由于重力势+压力势=常数，所以也可以说浮力等于作用于物体上各点的（静）压力势的合力。但是这在有渗流的条件下就不合适了（见图3）。

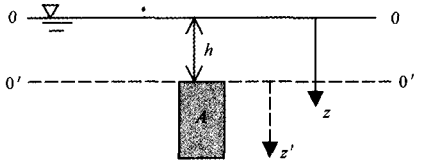


图2 静水压力与“参考点”无关

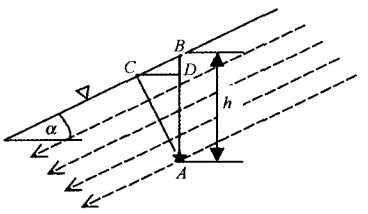


图3 沿坡稳定渗流情况下点A的水压力

在《岩土工程基本术语标准》（GB/T 50279-98）[3]中，孔隙水压力被定义为：“土体中某点孔隙水承受的压力”，这是可以接受的。而静水压力则被定义为：“给定点与自由水位差引起的压力”，这就不是很准确了，与陈文中的定义有相似之处。但陈文中注意到“有渗流时，$u=0$（亦即自由水位）的点不在同一水平面上”，因而“只有任选一个作为零静水压的参考点”。如上所述，这也是错误的。

图3表示的是一个有沿坡渗流的无限土坡，它没有一个水平的“自由水位”，作用于点A上的水压力并不是用与自由水位（$u=0$）之差AB计算的$u=\gamma_w h$，而是用通过该点的等势线AC的竖向投影AD计算的$u=$

〔收稿日期〕 2009-01-08

$\gamma_w h\cos 2\alpha$。如果按照“标准”定义 A 点的静水压力为 $\gamma_w h$，那么 $\Delta u = (1-\cos 2\alpha)\gamma_w h$ 是超静水压力吗？

3 超静孔隙水压力

关于静孔隙水压力与超静孔隙水压力的定义一直是使作者迷惘的问题[4]，也曾经与许多人讨论过，但仍不得要领。

文献[3]定义超静孔隙水压力为：“饱和土体中一点的孔隙水中超过静水压力的那一部分。”

$$\Delta u = B[\Delta\sigma_3 + A\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)] \qquad (1)$$

式(1)是超静孔压的 Skempton 公式，从式(1)看，这一定义至少存在两处漏洞。当 $B<1.0$ 时，土并不是“饱和”土；当 $A<0$ 时，会产生负的超静孔隙水压力，它就不是“超过”而是“低于”静水压力的部分。

笔者定义静孔隙水压力与超静孔隙水压力如下，并与同行们切磋：

(1) 静孔隙水压力是“由水的自重产生的孔隙水压力”，这样，图2、3表示的情况都可以归入静孔隙水压力。亦即包括了静水和一般渗流的情况。

(2) 超静孔隙水压力可以定义为“由土的变形趋势引起的孔隙水压力”，亦即土体本应发生应变，但由于排水受阻，土中产生孔隙水压力，使作用于土骨架上的有效应力发生变化，从而限制其变形。可以有如下情况：

(a) 土中的压缩应力引起的超静孔隙水压力

在各向等压应力和一侧限压缩应力条件下，土骨架有压缩的趋势，但在饱和土不排水条件下，由于土颗粒和孔隙水均不可压缩，整个土体的体积不变，土骨架上有效应力不能变化，增加的总应力全部转变为超静孔隙水压力，亦即：

$$\Delta u = \Delta p = \Delta\sigma_3 \qquad (2)$$

(b) 剪应力引起的超静孔隙水压

如果剪应力会引起土骨架的剪缩，在不排水饱和土体中，由于不允许总体积收缩，只有产生正的超静孔隙水压力，以减少有效应力，从而保持土体的体积不变；在剪胀的情况下，会产生负的超静孔隙水压力，增加有效应力，强迫土的体积不胀。

(c) 饱和细松砂的振动液化

在干砂和充分排水时，振动会使松砂的颗粒在自重作用下跌落到更“稳定”的位置，从而体积收缩。在饱和松砂中，砂的体缩必定伴随孔隙水的排出，由于水的粘滞性，土中水无法在振动的瞬时排出而实现体缩，这就需要产生正孔压，使砂粒无法靠自重下沉。因而正超静孔隙水压力要平衡土骨架的自重(浮容重)，使砂土颗粒处于悬浮状态。

(d) 在各种循环荷载下

试验表明，在排水条件下，不同应力路径上单调的应力增减、主应力方向周期变化、π 平面上沿着不同应力路径的循环变化都会引起土的体积收缩。相应的，在不排水条件下则引起正的超静孔隙水压力。

在饱和度较高的非饱和土情况下土的变形趋势也会引起与上述情况类似的超静孔隙水压力。

由于超静孔隙水压力是由土的变形趋势引起的，所以它常常会伴随着土的渗流固结，如果充分排水，最后土体还是会发生应有的全部变形，亦即完成主固结。所以与超静孔隙水压力有关的问题常常需要固结理论与土的应力应变数学模型耦合来解决。静孔隙水压力及其变化也会引起土的变形，但这种变形常被忽略，也不涉及渗流固结理论。

4 结语

静与超静两种孔隙水压力在本质上是相同的，它们都可用通过该点的测管水头来衡量，在有限元计算中也常常不加区别。

孔隙水压力与所选的基准面(参考点)无关，与基准面有关的只是位置水头(或者重力势)。

本文给出的静与超静两种孔隙水压力定义表明，静止地下水中和一般渗流中的孔隙水压力都可以归入静孔隙水压力；产生渗流固结的水压力为超静孔隙水压力。

另外，对陈文还有一些不解：

(a) 对照陈文的图2和式(3)，$u_1 = \gamma_w z$，亦即土体中静水压力为负值，显然不确；

(b) 陈文的式(5)、(6)的体积积分的增量为线增量 $\mathrm{d}z, \mathrm{d}\tau$；

(c) 在其图2中，并没有说明取的是微单元，所以文中 $\dfrac{\partial u_2}{\partial z} = \dfrac{h_1 - (h_w - L\sin\alpha)}{L}$ 是不准确的。

参 考 文 献

[1] 陈津民. 土中渗透力的定义和论证[J]. 岩土工程界，2008，11(10)：22～24.

[2] 陈仲颐，周景星，王洪瑾. 土力学[M]. 北京：清华大学出版社. 1994.

[3] 《岩土工程基本术语标准》(GB/T 50279－98)[S]. 北京：中国计划出版社 1998.

[4] 李广信. 土体、土骨架、土中应力及其他，兼与陈津民先生讨论[J]. 岩土工程界，2005，8(7)：14～17.