

地下水渗流对基坑支护结构上水土压力的影响分析*

王 洋, 汤连生, 杜赢中
(中山大学地球科学系, 广东 广州 510275)

摘 要:暴雨或长时间的降雨、地下水管的渗漏等是造成地下水渗流的重要条件,对基坑支护结构的安全影响大,也是为何基坑事故多发生在降雨之后的根源。分析了基坑开挖过程中地下水渗流产生的条件,并从地下水渗流对土体强度的影响、对作用在支护结构上水压力的影响、对土体自重应力的影响3个方面进行了分析。认为地下水渗流增大了支护结构上的土压力,对于粘性土判断采用“水土合算”或“水土分算”的依据不只是土体渗透性的大小,关键在于渗流是否发生。在支护结构的土压力计算中,只要支护结构在开挖和使用阶段基坑外侧存在地下水渗流,对于粘土和粉土应当采用水土分算的计算方法。因此,在基坑工程中,预防和阻止地下水渗流的发生是相当重要的一个环节。

关键词:地下水;渗流;基坑;水土压力

中图分类号: TU432 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2003) 02-0107-04

近年来,基坑支护结构上的水土压力的计算越来越受到重视,其中一个主要的原因是由于地下水引发的工程事故不断发生。据统计,由于水引发的工程事故约占21.4%^[1]。这表明目前在原状土体在开挖过程中水土与支护结构相互作用、水土之间相互作用机理的认识还不够深入和透彻。

基坑既是一个应力场、位移场,还是一个复杂的渗流场。在基坑的开挖过程中,随着基坑深度的增加,渗流场也在不断变化。土体的各向异性和成层分布、止水结构和降水措施等因素,也会使基坑渗流场变得复杂。为了研究的方便,我们假定以下条件:支护结构同时也是止水结构;支护结构外侧的土体不存在不透水层;支护结构的底部不是不透水层;支护结构外侧土体的渗透性基本一致,不考虑土体分层和各向异性。渗流场的示意图见图1。下面,就地下水渗流发生的前提条件、对土体抗

剪强度的影响、对支护结构上水压力的影响以及对土体自重应力的影响等几个方面进行分析。

1 地下水渗流发生的前提条件

地下水渗流的发生,具备3个条件:水头差,土层具有一定的渗透性,充足的水量补给。

充足的水量补给,是最根本的一个条件。如果地下水位在基坑底以下,对基坑外侧底土体中而言,当然不用考虑渗流。如果水量补给来自降雨,那么渗流就取决于降雨强度的大小和持续的时间。对于基坑附近存在水源的情况,还要考虑水源与基坑之间的距离。

基坑的开挖过程,导致基坑内外水头差的存在,这个条件一般都具有。

土颗粒的大小、级配、充填、胶结,土的密实度,颗粒的矿物成分,层理结构等都控制和影响着土的渗透性大小。如密实的粘土颗粒在外围具有较厚的结合水膜,它占据了土体内部的过水通道,渗透只能在较大的水力梯度作用下,挤开结合水膜的堵塞才能发生,如果水力梯度不够大,渗流就不会发生。所以说,土层的渗透能力是相对的,不是绝对的,它取决于水力梯度的大小。而且,对于层理发育的土体,水平方向和垂直方向渗透性差别很大。土体的渗透系数 K 值与其它物理力学性质指标相比,其变化范围要大得多,不同类土的渗透系

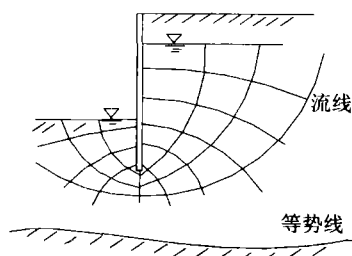


图1 渗流场的示意图
Fig.1 Sketch of the seepage field

* 收稿日期: 2002-03-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59779019); 广东省自然科学基金资助项目(970127)

作者简介: 王洋(1977年生),男,硕士研究生; 通讯联系人: 汤连生; E-mail: eestls@zsu.edu.cn

数 K 值如表 1 所示^[2]。

表 1 土的渗透系数值

Tab.1 Penetration coefficient of soil

土的类型	渗透系数/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	土的类型	渗透系数/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
粘土	$< 5 \times 10^{-8}$	细砂	$1 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-5}$
亚粘土	$5 \times 10^{-8} \sim 5 \times 10^{-6}$	中砂	$5 \times 10^{-5} \sim 2 \times 10^{-4}$
轻亚粘土	$1 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-6}$	粗砂	$2 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-4}$
黄土	$2.5 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-6}$	圆砾	$5 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-3}$
粉砂	$5 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-5}$	卵石	$1 \times 10^{-3} \sim 5 \times 10^{-2}$

由表 1 可见,土的透水性由强到弱,渗透系数相差悬殊。从粗砂到粘土,其透水性相差 10^4 倍;而从轻亚粘土到粘土渗透性也相差 100 倍以上。

目前大多数工程勘察中都是采集土样进行室内试验测定含水层 K 值,由于试验土样较小,且脱离了天然环境,实验结果往往与天然环境下的实际值有相当大的差别,而且常常偏小,如果土层中夹有薄层粘性土和细小的透镜体,则试验的结果往往更偏小,与实际的透水能力相差甚远。

所以,弄清楚土层的渗透性,对考虑土层渗流发生的可能性是相当重要的。

2 渗流对土体强度的影响

土体的抗剪强度有两个指标。水在土体骨架中的定向流动,对土体的作用除了力学(静力、动力)作用外,还影响土的力学性状,使土颗粒间产生移动或错位,而且必然会冲刷掉一部分比较小的颗粒,进而在一定程度上破坏了土体的强度。土体的抗剪强度会随着水头的增加而减小,即内摩擦角和粘聚力随水头增加而减小。同时,随着渗流的持续作用,土体的抗剪强度也会随着时间的增加而减小。上述结论已经由以下实验进行了证实。

刘广胜等用实验模拟了渗流对土体抗剪强度的影响^[3]。实验情况简单介绍如下:以常规三轴剪力仪为基础,改进和设计了一些实验设备,模拟了在某一周围压力下,施加渗透水头并保持试验过程中不变,当进水量和出水量相同时开始进行剪切,剪切速率 $0.012\% \sim 0.003\%$ 。此次试验采用的土样是粉土,物理性质指标如下:含水量 30.42%,湿密度 1.95 g/cm^3 ,干密度 1.50 g/cm^3 ,孔隙比 0.81,饱和度 100%,液限 36.0,塑限 21.7,塑性指数 14.3,渗透系数 $2.1 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 。

轴向应变较小时的初始阶段,主应力差增加比较迅速,随着轴向应变的增加,主应力差的增加趋缓。当围压较小时,出现软化特征,表明土的抗剪能力降低。

粘聚力随着相对水头的增加而减小,表明土的结构受到一定程度的破坏,原始粘聚力和固位粘聚力部分丧失。

此外,渗流的持续时间长短对土体强度的影响程度是不一样的,由于本实验未考虑这一个方面,所以在这一方面还需进一步的实验研究。

3 渗流对作用在支护结构上水土压力的影响

3.1 考虑渗流的“水土分算”

比较分析对于弱透水性的粘性土,在计算水土压力时,之所以存在以上两种意见的原因在于对地下水对土的作用认识不一致。实际上地下水对土的作用是通过土质介质之间的孔隙水的作用施加的,而孔隙水的存在及孔隙水压力的形成是与土的渗透性密切相关的。渗透性强的土体中,孔隙水是水力连通的,易于形成孔隙水对土颗粒的浮力作用,故采用浮容重 γ' 计算,此时可以认为孔隙水压力即静水压力;而渗透性弱的土体,如透水性很小的粘性土,其孔隙介质与水之间的关系极为复杂,不仅不易形成孔隙水对土粒的浮力作用,所产生的孔隙水压力已不是严格意义上的静水压力。正是基于这种认识,国外工程师在计算时采用总压力法把水土压力合并计算,而不计及墙上的水压力^[4]。

对于粘性土,规范上的水平荷载计算公式是采用“水土合算”的方法,并不考虑渗流的发生与否。但是,地下水渗流的产生,导致支护结构上水压力的变化,使“水土合算”的方法不再适用。因为“水土合算”的方法的前提是粘性土中不可能存在对工程有意义的渗流。所以,即便是粘性土,只要土体中存在渗流,考虑“水土分算”的方法是比较合理的。计算公式可以根据砂土“水土分算”的公式进行修改。

水土合算法一般适用粘土和粉土,不少实测资料也证实,采用这种水土合算的方法是合适的。不存在渗流的情况下,水土合算法无疑是合适的。但是,存在渗流的粘性土或粉土中,情况是有相当大的差别的。

渗流力计算的基本思路是静水压力的一部分转化为渗流力作用在土体骨架上,剩余的部分作为孔隙水压力。

$$\text{渗流力} \quad P_1 = i\gamma_w, \quad i = \frac{H_1}{H_1 + 2H_2}$$

剩余的孔隙水压力

$$P_2 = H_w(\gamma_w - i\gamma_w) = H_w\gamma_w(1 - i) \quad (1)$$

在水土分算分析中,结合图 2 可进行以下分析:那么按照水土分算,主动区 e_{ai} (支护结构水平荷载

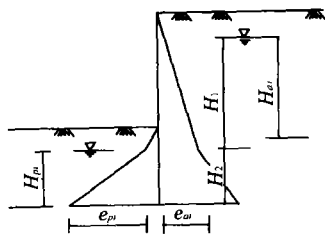


图2 基坑内外水土压力示意图

Fig.2 Sketch of the water and soil pressure

标准值)可写成:

$$e_{ai} = H_{ai}(\gamma'_i + i\gamma_w)K_{ai} + H_{ai}(1-i)\gamma_w - 2c\sqrt{K_{ai}} \quad (2)$$

对于被动区,渗流起顶托作用,故

$$P_1 = -i\gamma_w,$$

$$P_2 = H_{pi}[\gamma_w - (-i\gamma_w)] = H_{pi}\gamma_w(1+i)$$

被动区 e_{pi} (基坑内侧水平抗力标准值)可写为:

$$e_{pi} = H_{pi}(\gamma'_i - i\gamma_w)K_{pi} + H_{pi}(1+i)\gamma_w + 2c\sqrt{K_{pi}} \quad (3)$$

由以上可以看出,考虑渗流时,在主动区和被动区分别增加了 $H_{ai}(1-i)\gamma_w$ 和 $H_{pi}(1+i)\gamma_w$, 主动区侧压力的增加对支护结构是不利的。

3.2 渗流对土体自重应力的影响

地下水在渗流的过程中,受到土体骨架的阻碍,导致土体骨架上作用有渗流力。单位体积的渗流力大小是 $\gamma_w i$ (γ_w 是水的重度, i 是基坑内外产生的水头梯度), 方向与地下水的流线方向一致^[5]。渗流力的方向在主动区与被动区不一样, 而且与水平方向有一个夹角, 主动区夹角为 α , 被动区为 β 。在基坑外侧, 地下水在流动中, 有一部分竖向的动水力分量。在竖向分量的作用下, 主动区地下水位以下的土体的自重应力发生变化, 即在单位体积的自重应力上叠加了单位体积的渗流力竖向分量 $\gamma_w i \sin \alpha$ 。同理, 在被动区的渗流力的竖向分量是 $-\gamma_w i \sin \beta$ 。

主动区 e_{ai} 可写成:

$$e_{ai} = H_{ai}(\gamma'_i + i\gamma_w)K_{ai} - 2c\sqrt{K_{ai}} + \gamma_w i \sin \alpha \quad (4)$$

被动区 e_{pi} 可写为:

$$e_{pi} = H_{pi}(\gamma'_i - i\gamma_w)K_{pi} + 2c\sqrt{K_{pi}} - \gamma_w i \sin \beta \quad (5)$$

由公式(4),(5)可以看出,在主动区,渗流力使地下水位以下的土体自重应力增加,相应的水位以下部分的主动土压力增加;在被动区,渗流力使土体自重应力变小,相应的被动土压力减小。所以,在考虑地下水渗流时,主动土压力增大,被动土压力减

小,这种状况对支护结构是不利的。

3.3 综合考虑

综合考虑 3.1 和 3.2 两个方面的因素,可以将公式改写为:

主动区 e_{ai} 可写成:

$$e_{ai} = H_{ai}(\gamma'_i + i\gamma_w)K_{ai} + H_{ai}(1-i)\gamma_w - 2c\sqrt{K_{ai}} - \gamma_w i \sin \alpha \quad (6)$$

被动区 e_{pi} 可写为:

$$e_{pi} = H_{pi}(\gamma'_i - i\gamma_w)K_{pi} + H_{pi}(1+i)\gamma_w + 2c\sqrt{K_{pi}} - \gamma_w i \sin \beta \quad (7)$$

值得注意的是,公式(6)和(7)中,考虑到渗流对粘聚力和内摩擦角的削弱随着时间会不断加强, c , K_{ai} , K_{pi} 都不会是一个常数,所以在计算中要仔细考虑。

4 结 论

(1)在土体的渗透性测试中,由于测试手段的限制,往往测出的渗透性与实际情况相差较大。而且,对同一类土体,渗透性也可能相差较大。所以,在考虑地下水渗流的时候,必须弄清楚土体的渗透性,以判断渗流发生的可能性。

(2)地下水渗流的存在,减小了土体自身的抗剪强度,而且,随着渗流时间的推移,土体的强度还会进一步降低。同时,渗流还增大了作用在支护结构上的水压力,增大了地下水位以下土体的自重应力。所以,渗流的影响增大了支护结构上的侧压力,对支护结构的安全使用有负面影响。

(3)在支护结构设计时,只要支护结构在开挖和使用阶段基坑外侧存在地下水渗流,对于粘土和粉土采用水土分算的方法是比较合适的。对于粘性土,判断采用“水土合算”或“水土分算”的依据不仅仅是土体渗透性的大小,关键在于渗流是否能够发生。

(4)暴雨或长时间的降雨、地下水管的渗漏等是造成地下水渗流的重要条件,对基坑支护结构的安全影响较大,也是为何基坑事故多发生在降雨之后的原因。所以,在基坑工程中,预防和阻止地下水渗流的发生是确保支护结构安全的重要一环。

参考文献:

- [1] 王国光,严平,龚晓南,等.采取止水措施的基坑渗流场研究[J].工业建筑,2001,31(4):36-39.
- [2] 秦四清,万林海,汤天鹏,等.深基坑工程优化设计[M].北京:地震出版社,1998:68.
- [3] 刘广胜,赵维炳.基坑施工中渗流对抗剪强度的影响

- [J]. 水利水运科学研究, 2001(1): 54 ~ 57.
- [4] 李广信. 深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.
- [5] 孙淑贤. 基坑开挖伴随应力状态改变对土压力的影响 [J]. 工程勘察, 1998(3): 5 ~ 8.

Effect of Groundwater Seepage on Water and Soil Pressure in Brace System of Excavation

WANG Yang, TANG Lian-sheng, DU Ying-zhong

(Department of Earth Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Torrential rain, continuous rainfall and leakage of underground water pipes are important conditions that cause seepage of groundwater, resulting in high frequency of occurrence of foundation accidents. Therefore, the present study focuses on the effect of groundwater leakage on the strength of soil mass, on water pressure acting on retaining structure, and on the self-gravity stress of soil mass. Results show that not only the magnitude of soil mass' penetrability but also the groundwater leakage must be taken into account in predicting the safety of retaining structure of foundation pit no matter which calculation is used. The approach with separate calculation of water and soil should be adopted if the leakage of groundwater exists outside a constructing foundation pit.

Key words: groundwater; seepage; excavation; water and soil pressure