

# 支护结构上水土共同作用的微观机理研究

蒋希雁<sup>1</sup>, 周若雯<sup>2</sup>

(1. 河北建筑工程学院土木工程学院, 河北 张家口 075024; 2. 河北省第四建筑工程有限公司, 河北 石家庄 050000)

**摘要:** 为解决水土压力合算和分算的争议, 从理论上证明粘性土水土合算在某些情况下的合理性, 基于微观层面分析了土中孔隙及土中水的类型及特征, 研究了水土共同作用的微观机理, 建立了临界重度方程及估算公式, 给出了粘性土传递孔隙水压力的判别公式; 选取不同地区粘性土, 进行重力失水试验, 试验结果表明: 试验值与公式计算值差异很小, 试验验证了公式的合理性. 综合机理分析及试验成果, 证实了对于现有基坑工程中所涉及的粘性土, 其孔隙中仍然存在可流动的孔隙水, 一般都能传递孔隙水压力, 水土压力应当区别对待.

**关键词:** 粘性土; 孔隙水压力; 水土共同作用; 微观机理

**中图分类号:** TU46      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1006-7930(2014)01-0022-05

随着大规模基坑和地下工程的发展, 支护结构上的水土压力计算得到越来越多的重视和讨论<sup>[1-3]</sup>. 由于我们对原状土开挖过程中水-土-挡土结构共同作用机理的认识不够深入透彻, 在基坑支护结构的设计计算中凸现出许多问题, 一方面, 大量的实测结果显示支护结构上的实际内力远小于理论计算值; 另一方面, 每年仍有大量的基坑事故频发, 并且地下水往往是事故的罪魁祸首.

水土压力计算问题长期困扰岩土工程界, 曾经引起很大争议. 针对砂土而言, 采用有效应力强度指标, 选用水土分算, 并不存在分歧, 计算结果与现场实测接近, 且符合有效应力原理; 但对于粘性土, 则存在截然不同的几种观点和不同的处理方法<sup>[4-9]</sup>. 粘性土采用水土合算与实测较为接近, 但相当于对水压力进行了折减, 不符合有效应力原理. 一些学者反对粘性土的水土合算, 认为偏于不安全; 也有一些人支持粘性土水土合算, 认为水土合算可能存在一些微观机制<sup>[10-12]</sup>, 但没有在微观机制上进行定量分析. 基于上述争议, 启发更深层次的思考, 水土分算法的理论基础“有效应力原理”针对低渗透性的粘性土是否仍然适用? 水土合算法是否存在一些合理的微观基础? 要回答上述问题需了解粘性土的微观结构特征、粘性土中水的存在形式、水土共同作用机理及孔隙水压力的传递机理.

## 1 试验微观分析

### 1.1 土体中的孔隙

文献[13]对具有天然原状结构的粘性土进行孔隙分布试验, 粗略将土中孔隙分为5类: ①大孔隙, 孔径 $d > 8 \mu\text{m}$ , 包括孤立孔隙和部分连通的粒间孔隙, 内含结合水和自由水, 后者占主导地位; ②中孔隙, 孔径 $3 \mu\text{m} \leq d < 8 \mu\text{m}$ , 以粒间孔隙为主, 包括部分大孔隙压缩转换而来的孔隙, 孔隙直径大, 连通性好, 对土的压缩性及渗透性影响显著, 孔隙水以自由水为主, 结合水次之; ③小孔隙, 孔径 $0.3 \mu\text{m} \leq d < 3 \mu\text{m}$ , 含部分粒内孔隙以及由上两级孔隙压缩后的孔隙; ④微孔隙, 孔径 $0.09 \mu\text{m} \leq d < 0.3 \mu\text{m}$ , 主要为粒间孔隙, 连通率高, 是渗透固结的主要通道; ⑤超微孔隙, 孔径 $d < 0.09 \mu\text{m}$ , 主要为粒内孔隙, 完全为结合水, 对土性影响不大.

### 1.2 土体中的孔隙水

无粘性土由于颗粒粗大, 颗粒表面没有电性, 比表面面积小, 孔隙水的存在形式是自由水, 孔隙水之间互相连通, 能自由传递应力. 在粘性土中, 粘粒的含量和类型对土的性质起着决定性的作用. 粘粒粒径一般小于 $2 \sim 5 \mu\text{m}$ , 颗粒表面带有负电荷, 比表面积大, 孔隙水受粘粒表面电性吸引, 形成双电层, 孔隙水受土粒表面双电层的影响程度分为强结合水、弱结合水、毛细水、重力水4种形式. 前2种合称结合水, 后两种合称自由水. 结合水具有与自由水不同的性质, 密度高, 粘滞性大, 流动性差等特点, 这种差异随

着与颗粒表面距离增加而减弱. 较为形象、直观的模式是前苏联学者 P.H. 兹洛切夫斯基卡娅基的结构图<sup>[14]</sup>, 该学者基于结合水的性质和形成机理, 将粘性土中的结合水分为吸附结合水和渗透吸附水两大类, 见图 1. 吸附结合水具有固相特性, 它不受重力束缚; 渗透吸附水(弱结合水)具有液相性质, 它受重力的影响, 是土中水渗流的主要载体之一, 能传递孔隙水压力.

## 2 孔压传递的判断标准

粘性土颗粒中存在大量结合水. 强结合水具有明显的固态特性, 基本不发生迁移; 弱结合水在一定程度上受骨架吸附力作用, 要驱使这部分水体迁移, 需要施加一定的外加势能. 由于土颗粒与结合水共同作用, 仅自由水及部分弱结合水传递在重力作用下的孔隙水压力, 若粘性土中的水分以强结合水为主时, 可以认为此时土体不透水, 亦即孔隙水压力不能传递. 土中的水是否以强结合水为主, 与粘性土吸附结合水的能力有关, 同时与粘性土孔隙的大小及类型有关. 因此, 通过研究土体孔隙特征同强结合水之间的关系, 参照文献<sup>[15]</sup>建模思想, 可以建立粘性土中是否传递孔隙水压力的判断标准.

当粘性土中只存在强结合水时, 此时土颗粒与孔隙水完全共同作用, 土颗粒与孔隙水像一个大的水土共同作用的颗粒, 可将这部分固态水体视作土颗粒的增长体积, 将粘性土土颗粒膨胀系数定义为:

$$\eta = \frac{\gamma_s}{\gamma_{cw}} \omega_c \quad (1)$$

式中,  $\gamma_s$  为土颗粒容重;  $\gamma_{cw}$  为强结合水的平均容重, 约为  $13 \text{ kN/m}^3$ ;  $\omega_c$  为强结合水含水量. 相对骨架比  $\xi$  为:

$$\xi = 1 + \frac{\gamma_s}{\gamma_{cw}} \omega_c = 1 + \eta \quad (2)$$

当粘性土中不存在强结合水时, 粘土的孔隙比为  $e$ , 当有强结合水存在时, 其有效孔隙比为  $e'$ , 则依据相对骨架比定义:

$$\xi = \frac{1 - e}{1 + e'} \quad (3)$$

由(2)、(3)两式可得有效孔隙比的表达式为:

$$e' = \frac{e - (1 + e)\eta'}{1 + (1 + e)\eta'} \quad (4)$$

式中  $\eta' = (\gamma_d / \gamma_{cw}) \omega_c$ , 其物理意义为干重度  $\gamma_d$  的单位土颗粒膨胀系数. 把  $e = (\gamma_s / \gamma_d) - 1$  代入式 (4) 得:

$$e' = \frac{\gamma_s - \gamma_d - \gamma_s \eta'}{\gamma_d + \gamma_s \eta'} = \frac{\gamma_s}{\gamma_d + \gamma_s \eta'} - 1 \quad (5)$$

由上式可见, 粘性土的有效孔隙比只取决于土体的干重度, 强结合水含量及其重度. 当土体中孔隙被压密减小到只含有强结合水时, 此时孔隙水不能流动, 不能传递孔隙水压力. 令  $e' = 0$ , 可得此时的土体临界干重度  $[\gamma_d]$  为:

$$[\gamma_d] = \frac{\gamma_s \gamma_{cw}}{\gamma_{cw} + \gamma_s \omega_c} \quad (6)$$

式 (6) 为判断粘性土中能否传递孔隙水压力的临界干重度方程,  $[\gamma_d]$  定义为孔压传递临界重度. 当土体干重度  $\gamma_d \geq [\gamma_d]$  时, 土孔隙中完全充填强结合水, 此时不能传递孔隙水压力; 当  $\gamma_d < [\gamma_d]$  时, 粘性

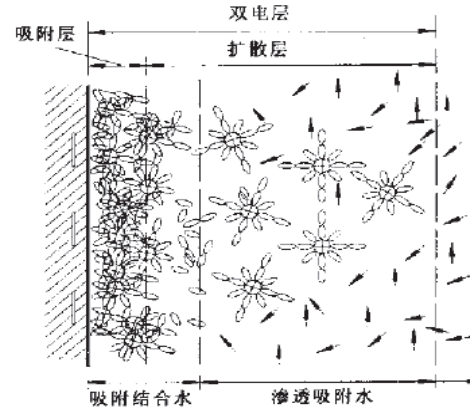


图 1 粒间孔隙水存在模式

Fig.1 Type of inter-aggregate pore water in cohesive

土中存在可流动的弱结合水或自由水,能传递孔隙水压力.

要采用式(6)判断粘性土中是否能发生孔压传递,其中一个重要的指标即是确定土中的强结合水含量,常用的方法包括:x射线衍射法、加压排水法、离心机法、吸湿法等.鉴于实际工程中测试结合含水量较为困难的事实,这里推导一种间接反映结合水含量大小的近似公式.

M.Vlahovic曾将有效孔隙率定义为

$$n'=n-\omega_p$$

(7)

式中:  $n'$  为有效孔隙率;  $n$  为孔隙率;  $\omega_p$  为粘性土的塑限含水量.

根据换算关系式  $n'=e'/(1+e')$ 、 $n=1-\gamma_d/\gamma_s$  及式(5),可得强结合水含水量的估算公式

$$\omega_c \approx \frac{\gamma_{cw}}{\gamma_d} \omega_p$$

(8)

将式(8)代入式(6)可得临界重度的近似公式

$$[\gamma_d] \approx \frac{\gamma_s \gamma_d}{\gamma_d + \gamma_s \omega_p}$$

(9)

3 试验分析

粘性土中强结合水与土颗粒的吸引力大于所受的重力,这部分水与重力水的形态不同,不会在重力作用下流动.故可以认为仅自由水及部分弱结合水传递在重力作用下的孔隙水压力.基于强结合水不受重力制约这一原理,可以通过试验,测试粘性土含水量随时间变化情况,间接半定量地反映其结合水含量.

试验中选取了天津粘土及张家口粉质粘土

饱和土样若干,土样的物理特性指标见表1.将土样置于密闭的空气湿度达到饱和状态的保湿容器中让其在重力下失水,而后按不同时间间隔,取样测试其含水量,直至其含水量稳定,认为此时土中的水主要为强结合水.

试验中,当重力失水时间超过一定时间(天津粘土 168 h,张家口粉质粘土 144 h)后,含水量基本稳定,此时的含水量约为结合水含水量,包括强结合水和部分弱结合水,见图2.试验结果显示:天津粘土的结合水含水量约为 25.5%,小于其塑限含水量  $\omega_p=26.2\%$ ; 张家口粉质粘土为 11.5%,小于其塑限含水量  $\omega_p=16.3\%$ . 本试验推测的结合水含水量,大于实际强结合水量.

按式(8)算得的两种土样的结合水含量与试验值的对比结果,见表2.由表2可见,估算值与试验结果比较接近,故结合水含量一般在塑限含水量附近且小于它.

表 1 试验土样物理特性指标  
Tab.1 Physical characteristic of the test samples

试验土样	天然含水量/%	饱和度/%	天然容重/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	干重度/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	土粒相对密度	塑限/%	液限/%
天津粘土	34	94.9	18.6	13.8	2.76	26.2	49.5
张家口粉质粘土	16.1	85	19.8	17.1	2.72	16.3	27.1

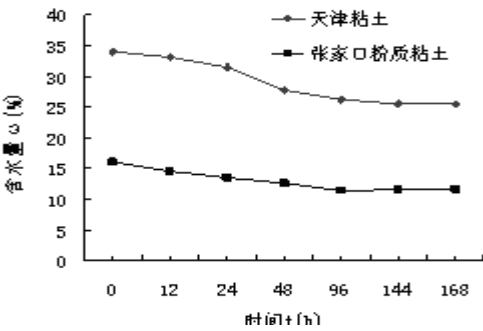


图 2 粘性土重力失水变化曲线  
Fig.2 Variation of gravity dehydration of clay

表 2 试验值与公式计算值对比  
Tab.2 Comparison of testing value and estimated value

土样名称	结合水含量/%		干重度/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	临界重度/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	孔压传递判断
	计算值	试验值			
天津粘土	25.0	25.5	13.8	17.9	能传递
张家口粉质粘土	12.4	11.5	17.1	21.9	能传递

按式(6)求得的临界密度并与  $\gamma_d$  比较,可判断为能传递孔隙水压力.

工程中所涉及的饱和粘土其含水量一般大于其塑限含水量,土中除含少量强结合水外主要含有大量的可流动的弱结合水和自由水,故总能传递孔隙水压力。

## 4 结论

本文以土体中的孔隙、孔隙中的水微观试验入手,通过对土体颗粒与水之间相互作用的微观分析,得出以下结论:

(1) 基于文献[15]的思想建立临界重度方程,给出了粘性土传递孔隙水压力的判别公式。当土体干重度 $\gamma_d \geq [\gamma_d]$ 时,土孔隙中全部为强结合水,此时不能传递孔隙水压力;当 $\gamma_d < [\gamma_d]$ 时,粘性土中存在可流动的弱结合水或自由水,能传递孔隙水压力。

(2) 选取若干天津粘土及张家口粉质粘土土样进行重力失水试验,以此间接估计结合水含量的大小。试验结果表明:两种土样的结合水含量均与其塑限含水量接近,并略小于该值;用试验测得的结合水含量估算土样的临界重度,其干重度小于该值,以此判断土样能够传递孔隙水压力。对于不同地区不同类型粘性土,尽管土体的矿物成份和结构特性略有不同使得土的颗粒形态及孔隙分布具有一定的差异,但其实际干密度很难超过其临界密度,土中孔隙水以弱结合水及自由水为主,在一定水头作用下孔隙水能发生迁移,总能传递孔隙水压力。只不过孔隙水压力传递的历时和程度有所差异,但随着时间的延续总能完成孔压的传递。

(3) 有效应力原理的前提是土中的孔隙水具有流动性和连通性,孔隙水压力能发生传递。无论是砂性土或是渗透性很低的粘性土,有效应力原理早已无容置疑地确立了它在土力学中作为基本原理之一的地位:亦即对粘性土而言,其孔隙中仍然存在可流动的孔隙水,也能传递孔隙水压力,有效应力原理是适用的。

(4) 综合机理分析及试验成果,证实了对于低渗透性的粘性土,有效应力原理仍然适用,水土压力计算时应当采用有效应力原理将水土压力区别计算,澄清了水土压力合算理论中的模糊认识。依托张家口市城投商业中心具体工程,开展水土压力的长期实时监测,研究水土压力的时程变化规律,探讨水土压力共同作用机理,并将计算结果同实测成果比较,证明了结论的合理性。

(5) 基于微观机制研究水土共同作用机理,以此完善土压力计算理论,对深基坑土压力的计算具有重要的理论及现实意义。

## 参考文献 References

- [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.  
WEI Rulong. Issues on calculation of earth pressure using total stress method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(6): 120-125.
- [2] 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.  
CHEN Yujiong, WEN Yanfeng. Water and earth pressures on the supporting structure around a foundation pit[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(2): 139-143.
- [3] 罗文林, 韩煊, 刘赓炜. 侧向水土压力计算方法的对比研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(supp.1): 83-88.  
LUO Wenlin, HAN xuan, LIU chengwei. Comparative study on lateral water and earth pressures on retaining structures, Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(supp.1): 83- 88.
- [4] 沈珠江. 基于有效固结应力理论的粘土土压力公式[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(3): 353- 356.  
SHEN Zhujiang. Earth pressure of clay based on effective consolidation stress theory[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(3): 353- 356.
- [5] 章胜南. 成层土中围护结构所受水土压力的计算[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(4): 95-97.  
ZHANG Shengnan. Water and earth pressures acting on retaining structure in layered soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(4): 95-97.
- [6] 刘国彬, 黄院雄, 侯学渊. 水与土压力的实测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(2): 205-210.  
LIU Guobin ,Huang Yuan-xiong, Hou Xueyuan. Discussion on water and earth pressure of supporting structure in soft area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2000, 19(2): 205-210.
- [7] 姚秦. 基坑工程的水土压力混合算法[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(1): 134 -135.  
YAO Qin. Earth pressure calculation considering soil-water jointly on excavation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and

- Engineering, 2001, 20(1): 134-135.
- [8] 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.  
WANG Hongxin. Verification of unified calculation theory of water and earth pressures and calculation of pressure under interaction of water and earth[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(2): 392-398.
- [9] 靳雪梅, 邓庆阳, 孟胜国. 作用在柔性支护结构上的水及土压力的分析与探讨[J]. 建筑科学, 2011, 27(3): 28-33.  
JIN Xuemei, Deng Qingyang, Meng Shengguo. Analysis and Discussion of Water and Earth Pressure on the Flexible Supporting Structure[J]. Building science, 2011, 27(3): 28-33.
- [10] 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): 348-353.  
LI Guangxin. Estimating the water and earth pressures on the supporting structure around a foundation pit separately and together[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(3): 348-352.
- [11] 曹雪山. 支护结构上水土压力计算微观分析[J]. 四川建筑科学研究, 2006, 32(5): 106-110.  
CAO Xueshan. Micro-analysis of water pressure and earth pressure on support structure[J]. Building Science Research of Sichuan, 2006, 32(5): 106-110.
- [12] 方玉树. 基于水压率讨论土中孔隙水压力及有关问题[J]. 岩土工程界, 2007, 10(5): 21-26.  
FANG Yushu. Discussion on pore pressure and related problems considering hydraulic pressure ratio[J]. Geotechnical Engineering World, 2007, 10(5): 21-26.
- [13] 吕海波, 汪稔, 赵艳林, 孔令伟. 软土结构性破坏的孔径分布试验研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(4): 573-578.  
LÜ Haibo, WANG Ren, ZHAO Yanlin, et al. Study of structure characteristics evolution of soft clay by pore size distribution test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(4): 573-578.
- [14] 王秀艳, 刘长礼. 深层黏性土渗透释水规律的探讨[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(3): 308-312.  
WANG Xiuyan, LIU Changli. Discussion on permeate discharge water of clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(3): 308-312.
- [15] 吴凤彩. 粘性土的吸附结合水测量和渗流的某些特点[J]. 岩土工程学报, 1984, 6(6): 84-93.  
WU Fengcai. Bound water measurement and Some characteristics of seepage of clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1984, 6(6): 84-93.

## Micro- mechanism analysis of interaction of water and clay on support structure

JIANG Xiyan, ZHOU Ruowen

(1. Hebei Institute of Architecture and Civil Engineering, Zhangjiakou 075024, China;

2. Hebei No.4 Construction Engineering Company, Shijiazhuang 050000, China)

**Abstract:** In order to resolve controversy of separate and combined calculation of water and earth pressures and to theoretically prove that combined calculation of water and earth pressure of clay is reasonable under some circumstances. The formation character of pores in the clay, the existence mode of pore water, the analysis of micro-mechanism of interaction of water and clay is established. The equation and estimating formula of critical density is defined to discriminate whether compact clay can transfer pore water pressure; The gravity dehydration test was studied by selecting different local clay, and the test result shows the slight differences between the results of test and estimated value, and the test verification of the formula rationality. The conclusion that clay is related to existing foundation pit project can generally transfer pore water pressure based on the studies above.

**Key words:** clay; Pore water pressure; Interaction of water and clay; Micro- mechanism

(本文编辑: 吴海西)