

考虑渗透性的水 - 土压力计算方法

徐日庆^{1,2}, 张庆贺¹, 刘鑫³, 廖斌¹

(1. 浙江大学岩土工程研究所, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058;
3. 西安市第二市政工程公司, 陕西 西安 710054)

摘要: 在弱渗透性黏性土中, 水 - 土压力的计算采用“水土分算”还是“水土合算”一直是学术界和工程界有争论的问题。上述两种土压力计算方法只考虑了极端情况, 没有充分考虑土体的物理特性, 计算结果差异很大。笔者根据不同土具有不同渗透性这一基本物理特性, 提出考虑渗透性的水 - 土压力计算方法, 该方法概念明确, 适用范围更广, 可以实现从无黏性土到黏性土的水 - 土压力计算且具有连续性, 最后通过算例验证了该方法的合理性。

关键词: 土压力; 水压力; 水 - 土压力; 渗透性; 水土分算; 水土合算

中图分类号: TU 432 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2012)05-0961-04

作者简介: 徐日庆(1962-), 男, 浙江金华人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事地基处理及土压力理论等方面的研究与教学工作。E-mail: xurq@zju.edu.cn。

Methods for calculating soil-water pressure considering permeability

XU Ri-qing^{1,2}, ZHANG Qing-he¹, LIU Xin³, LIAO Bin¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering of Ministry of Education, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China, 3. Xi'an Second Municipal Engineering Company, Xi'an 710054, China)

Abstract: There are two methods to calculate soil-water pressure in low permeability clay, soil-water pressure calculated jointly and soil-water pressure calculated separately. Which one to be taken to apply in engineering is controversial in academic and engineering circles. The two methods can only consider the extreme case, and the results are quite different. This is mainly because both methods do not fully take into account different physical properties of soils. A unified water-soil calculation formula considering the permeability of soils is proposed. This method is appropriate for most kinds of soils from sandy soil to clays and it ensures the continuity of earth pressure calculation. The concept of the method is very clear and the calculation can be used widely. Finally, the proposed method is validated by an example.

Key words: soil pressure; water pressure; soil-water pressure; permeability; separate calculation; joint calculation

0 引言

在进行支挡结构水 - 土压力计算时如何考虑水压力作用在学术界和工程界一直存在很大争议, 至今还没有一个统一的认识。“分算”基于有效应力原理, 理论上较为合理, 但黏性土中孔隙水压力难以测得, 且计算结果与实测值间存在较大差异; “合算”在渗透性弱的黏性土中计算值接近于实测值, 但存在理论缺陷。同时, “分算”与“合算”对水压力作用考虑方法完全不同: “分算”把孔隙水压力直接考虑成静水压力; “合算”将水土压力一起做相同的处理, 不再单独计及水压力作用。在基坑开挖过程中, 施工较快时, 由于土本身的渗透性差, 孔隙水压力来不及消散, 已不再是

严格的静水压力。两种方法只考虑了极端情况, 两者计算结果有很大的差异。

魏汝龙^[1]提出了固结应力法的概念, 并建议采用有效重度和固结不排水总应力强度指标计算土压力, 再加上全部静水压力, 即通过固结不排水强度指标考虑超静孔隙水压的影响, 静水压力则与土压力分开计算。

杨晓军等^[2]认为“水土合算”只是一种经验方法, 没有理论依据, 对软黏土地基临时性开挖的土压力计算, 建议采用总应力强度指标进行水土分算, 可以将超静水压力的影响考虑在抗剪强度指标中, 单独考虑

静水压力的影响，并建议采用卸载强度指标。

李广信^[3]认为，水土合算与土力学的基本原理有冲突，在机理上也有许多不明之处，有待进一步研究，水土分算的概念是清楚的，但在某些情况下很难确定孔隙水压力，在一些饱和原状黏性土中，可能不存在静水压力。

王钊等^[4]总结和分析了在静水压力、稳定渗流和超静水压力作用下，挡土结构上水土压力的计算方法，通过实例说明了水土分算与水土合算结果的差异及考虑水的渗流作用和超静孔压力作用对挡土结构上总压力计算的影响。

陈愈炯等^[5]则不赞成将总应力指标应用于水土分算的做法，认为既然为了绕过孔隙压力估算的难题，把水和土作为一个整体来考虑，就不必再追究其中的孔隙压力的作用机理。

以上文献对水-土压力计算问题都进行了深刻的剖析，主要从土的强度指标取值和渗流方面对公式进行了修正完善，但由于没有充分考虑土的物理性质，水土“分算”与“合算”之间的分歧仍没有较好地解决。本文尝试从土的物理性质这一角度来解决这个问题：将与水作用联系最为密切的渗透性考虑到土压力计算中，提出考虑渗透性的水-土压力计算公式。

1 现有水-土压力算法

现有水-土压力算法可分为以下三种：水-土压力分算、水-土压力合算和混合算法。

1.1 水-土压力分算

水-土分算是指水压力和土压力分开计算，即竖向有效应力在挡土结构上产生土压力，水压力则直接作用在支挡结构上，且各向等压。根据朗肯土压力理论可得到如下水-土分算理论公式：

$$\sigma_a = \gamma' Z_a K'_a - 2c' \sqrt{K'_a} + \gamma_w Z_a , \quad (1a)$$

$$\sigma_p = \gamma' Z_p K'_p + 2c' \sqrt{K'_p} + \gamma_w Z_p . \quad (1b)$$

式中 Z_a, Z_p 分别为主动区和被动区的计算深度； K'_a 为主动土压力系数， $K'_a = \tan^2(45^\circ - \varphi'/2)$ ； K'_p 为被动土压力系数， $K'_p = \tan^2(45^\circ + \varphi'/2)$ ； γ_w 为水的重度 (kN/m^3)； c' ， φ' 为有效应力指标。

目前，对于强透水性的碎石土和砂土，采用基于有效应力的水-土压力分算方法在学术界和工程界已达成共识。由于有效应力指标不易测得，在实际工程中，常采用一般形式的水土压力分算，对强度指标取值做了修正。式 (1a) 是《建筑基坑技术支护技术规程》(JGJ 120—99) 建议的主动土压力计算公式的一种特殊情况；式 (1b) 是规范中被动土压力计算公式

的一种特殊情况。强度指标采用三轴试验（当有可靠指标时可采用直接剪切试验）确定的固结不排水（快）剪强度指标的标准值^[6]。

1.2 水-土压力合算

水-土合算是指在计算土压力时考虑土体自重的总应力，即土压力中包含了水压力，水与土作为一个整体来考虑，不再单独计及水压力影响。根据朗肯土压力理论可得到水-土压力合算的理论计算公式：

$$\sigma_a = \gamma_{\text{sat}} Z_a K_a - 2c \sqrt{K_a} , \quad (2a)$$

$$\sigma_p = \gamma_{\text{sat}} Z_p K_p + 2c \sqrt{K_p} . \quad (2b)$$

式中 γ_{sat} 为地下水位以下用饱和重度 (kN/m^3)， K_a 为主动土压力系数； K_p 为被动土压力系数； c ， φ 为总应力强度指标。

基于总应力法的水-土合算是计算渗透性弱的黏性土水-土压力的一种常用的方法。式 (2a) 为规范中粉土及黏性土建议的主动土压力计算公式的一种特殊情况；式 (2b) 为被动土压力计算公式的一种特殊情况。强度指标采用三轴试验（当有可靠指标时可采用直接剪切试验）确定的本层土固结不排水（快）剪强度指标的标准值^[6]。

1.3 混合算法

文献[7]考虑黏粒含量的影响，提出了水-土压力的混合算法，计算公式为

$$\sigma_{\text{am}} = \alpha \gamma_{\text{sat}} Z_a K_a + (1-\alpha) \gamma' Z_a K_a - 2\alpha c \sqrt{K_a} - 2(1-\alpha) c' \sqrt{K'_a} + (1-\alpha) \gamma_w Z_a , \quad (3a)$$

$$\sigma_{\text{pm}} = \alpha \gamma_{\text{sat}} Z_p K_p + (1-\alpha) \gamma' Z_p K_p + 2\alpha c \sqrt{K_p} + 2(1-\alpha) c' \sqrt{K'_p} + (1-\alpha) \gamma_w Z_p , \quad (3b)$$

式中， $\alpha = I_p / 17$ 称为塑性指数比，当 $I_p > 17$ 时，取 17 计算，其他符号含义同前。

透水性强的无黏性土的水-土压力计算采用分算法已经达成比较一致的认识，但透水性较弱的黏性土水-土压力计算方法存在很大的分歧。在渗透性强的土体中，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，故采用浮重度计算，此时可以认为孔隙水压力即静水压力，直接作用在支挡结构上；而渗透性弱的黏性土水土作用的关系极其复杂，水的连通性差，不仅不易形成孔隙水对土颗粒的浮力作用，所产生的孔隙水压力已不再是严格意义上的静水压力，因此不能将水压力考虑成静水压力直接作用在支挡结构上，但同时也不是完全没有自由流动的静水，不考虑这一部分水压力对支挡结构的作用也不合适。分算法将孔隙水压力完全考虑成静水压力，夸大了水压力作用，对于渗透性较弱的黏土来说不合适；而合算法将水与土颗粒做相同的处理，即水压力也乘了侧压力系数显然不合适，这使得在计算主动土压力时低

估了水压力作用, 而在计算被动土压力时则高估了水压力作用。另外, 水土合算在概念上也与有效应力相矛盾。混合算法按塑性指数将水-土合算和分算进行分配, 考虑了黏粒土含量对土压力的影响, 相应的土压力计算值介于水-土分算与合算之间, 有一定的合理性。但该法仅仅对水-土分算与合算进行了简单的组合, 并没有从内在机理上解决分算与合算的矛盾, 且计算比较复杂。

2 考虑渗透性的水-土压力计算方法

鉴于以上提到的问题, 本文认为分算与合算的分歧主要是没有充分考虑土体本身的物理特性。影响水作用的一个重要因素是土的渗透性, 土的渗透性是土的成分、颗粒级配和结构等因素的综合体现。许多学者因为渗透性相差很大而不再考虑这一重要因素。本文通过对渗透性强弱和土压力变化规律的分析, 提出考虑土的渗透性的水-土压力的计算公式:

$$\sigma_a = (\gamma_{\text{sat}} - \alpha\gamma_w)Z_a K_{ak} - 2c_k \sqrt{K_{ak}} + \alpha\gamma_w Z_a, \quad (4a)$$

$$\sigma_p = (\gamma_{\text{sat}} - \alpha\gamma_w)Z_p K_{pk} + 2c_k \sqrt{K_{pk}} + \alpha\gamma_w Z_p, \quad (4b)$$

或表示为

$$\sigma_a = \gamma_{\text{sat}} Z_a K_{ak} - 2c_k \sqrt{K_{ak}} + (1 - K_{ak})\alpha\gamma_w Z_a, \quad (5a)$$

$$\sigma_p = \gamma_{\text{sat}} Z_p K_{pk} + 2c_k \sqrt{K_{pk}} + (1 - K_{pk})\alpha\gamma_w Z_p. \quad (5b)$$

式中, 主动土压力系数为 $K_{ak} = \tan^2(45^\circ - \varphi_k/2)$, 被动土压力系数为 $K_{pk} = \tan^2(45^\circ + \varphi_k/2)$ 。

从粗砂到黏土, 土体的渗透性相差很大(见表1), 最多可达9个数量级, 黏土之间相差也很悬殊。本文在上述水-土压力计算公式中引入了一个考虑渗透性的因子 α , 其计算式为

$$\alpha = \frac{2}{\pi} \arctan(k/k_0)^{1/2}. \quad (6)$$

k_0 为卡萨哥兰德(Casagrade, 1939)所建议的排水良好与排水不良的界限值, 取 1×10^{-4} cm/s。

表1 土的渗透系数^[8]

Table 1 Permeability coefficients of soils^[8]

土的类型	渗透系数/(cm s ⁻²)
砾石、粗砂	$b \times 10^{-1} \sim b \times 10^{-2}$
中砂	$b \times 10^{-2} \sim b \times 10^{-3}$
细砂、粉砂	$b \times 10^{-3} \sim b \times 10^{-4}$
粉土	$b \times 10^{-4} \sim b \times 10^{-6}$
粉质黏土	$b \times 10^{-6} \sim b \times 10^{-7}$
黏土	$b \times 10^{-7} \sim b \times 10^{-10}$

注: 表1中 $b \in [1, 9]$ 。

本文算法中对于渗透性好的无黏性土, 由于水力连通很好, 较易形成水对土的浮力作用, 采用有效应力指标, 即 $k > k_0$ 时, $\varphi_k = \varphi'$, $c_k = c'$; 对于渗透性较差的黏性土, 水的连通性较差, 不易形成对土的浮力

作用, 强度指标采用了总应力强度指标, 即 $k < k_0$, $\varphi_k = \varphi$, $c_k = c$ 。具体的强度指标随渗透性的变化有待进一步研究。

随着深度增加, 围压增大, 渗透性呈递减规律^[9]。当均质填土表面为平面时, 库伦理论认为土压力呈三角形分布。然而多数的试验观测表明, 刚性墙背的土压力呈曲线分布。所以公式(4)更能反映土压力的分布规律。

由式(4)或式(5)可以看出, 若渗透性好, 如 $k = 5 \times 10^{-3}$ cm/s, 可得 $\alpha = 0.910$, 相应的水-土压力计算结果比较接近于分算结果; 对于渗透性很差的黏性土, 如 $k = 5 \times 10^{-8}$ cm/s, 可得 $\alpha = 0.014$, 相应的水-土压力计算结果与合算结果几乎相同。对介于二者之间的中等渗透性土, 按照渗透性的不同对水压力作用都做了不同程度的考虑。因此, 本文考虑渗透性的计算公式(式(4)、(5))可以适用于无黏性土、黏性土以及渗透性介于二者之间的土的水-土压力计算, 应用范围十分广泛。

3 算例

下面通过算例来验证本文考虑渗透性水-土压力计算方法的优越性。某挡土墙墙背竖直光滑, 墙高6 m, 地下水与地面齐平, 土体参数为 $\gamma_{\text{sat}} = 20$ kN·m⁻³, $k = 8 \times 10^{-6}$ cm/s, $c_{\text{cu}} = 10$ kPa, $\varphi_{\text{cu}} = 18^\circ$, $c' = 6$ kPa, $\varphi' = 27^\circ$, $\gamma_w = 10$ kN·m⁻³, 计算结果如表2。

表2 3种算法计算结果比较

Table 2 Comparison among calculated results

土压力	算法		
	水土分算	水土合算	本文算法
主动土压力强度/kPa	75.2	48.8	53.8
主动土压力/kN	210.7	112.8	126.0
被动土压力强度/kPa	239.4	254.8	250.8
被动土压力/kN	718.2	764.4	752.4

由表2计算结果可知: 本文算法的结果在水土分算和水土合算的结果之间, 避免了合算法在计算主动土压力时低估静水压力的作用, 也没有在被动土压力中夸大静水压力作用, 而是根据渗透性的大小对静水压力做了恰当的考虑。土的浮重度部分也根据渗透性强弱做了修正(参考式(4)), 将“有效土压力”和水压力叠加即可得支护上的侧压力。另外, 文献[4]指出: 在计算总侧压力时水-土分算比水-土合算压力大很多的原因是合算没有考虑在临界深度范围内的水压力。若土的不排水强度的黏聚力较大, 求得临界深度较大, 计算的水土合算与分算的侧压力结果就会相差

很大。本文对临界深度算法做了相应的修正，得土拉力区的高度公式：

$$h_0 = \frac{2c_k}{(\gamma_{\text{sat}} - \alpha \cdot \gamma_w) \sqrt{K_{ak}}} \quad . \quad (7)$$

这样本文在临界深度范围内按渗透性强弱考虑了部分水压力，比较合理。

4 结语

本文针对水-土压力计算的研究现状，指出了水-土压力分算与合算产生分歧的根本原因在于二者均没有充分考虑土的物理特性，于是本文考虑与水压力作用联系最密切的因素——渗透性，提出了水-土压力计算公式。该公式在计算土压力时没有夸大或低估静水压力作用，避免了跳跃性变化，保证了从无黏性土到黏性土各类土土压力计算的连续性。同时，本文给出了考虑渗透性修正后的临界深度公式和侧压力计算公式。算例分析表明本文算法是合理的。由于渗透系数在工程中比较容易测得，因此本文算法可方便应用于实际工程。

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. (WEI Ru-long. Several problems of total stress method to calculate the earth pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(6): 120 - 125. (in Chinese))
- [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. (YANG Xiao-jun, GONG Xiao-nan. Calculation of earth pressure on excavation considering pore water pressure[J]. China Civil Engineering Journal, 1997, 30(4): 58 - 62. (in Chinese))
- [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. (LI Guang-xin. Estimating the water and earth pressures on the supporting structure around a foundation pit separately and together. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(3): 348 - 352. (in Chinese))
- [4] 王钊, 邹维列, 李广信. 挡土结构上的土压力和水压力[J]. 岩土力学, 2003, 24(2): 146 - 150. (WANG Zhao, ZOU Wei-lie, LI Guang-xin. Earth pressure and water pressure on retaining structure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(2): 146 - 150. (in Chinese))
- [5] 陈愈炯, 温彦峰. 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 Yu-jiong, WEN Yan-feng. Water and earth pressures on the supporting structure around a foundation pit. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(2): 139 - 143. (in Chinese))
- [6] JGJ 120—99 建筑基坑技术支护技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999: 10 - 13. (JGJ 120—99 Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations[S]. Beijing: China Architecture & Building, 1999: 10 - 13. (in Chinese))
- [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. (in Chinese))
- [8] 陈仲颐, 周景星, 王洪瑾. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 47. (CHEN Zhong-yi, ZHOU Jing-xing, WANG Hong-jin. Soil mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007: 47. (in Chinese))
- [9] 万力, 蒋小伟, 王旭升. 含水层的一种普遍规律: 渗透系数随深度衰减[J]. 高校地质学报, 2010, 16(1): 7 - 12. (WAN Li, JIANG Xiao-wei, WANG Xu-sheng. A Common Regularity of Aquifers: The Decay in Hydraulic Conductivity with Depth[J]. Geological Journal of China Universities, 2010, 16(1): 7 - 12. (in Chinese))