

饱和黏性土的总强度与基坑工程水土合算土压力分析方法

高彦斌, 姚天骄, 杨正园

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 回顾了饱和黏性土总强度 S_u 的概念以及“ $\varphi=0$ 法”的基本原理,指出直接将三轴固结不排水强度指标 c_{cu} 、 φ_{cu} 和直剪固结快剪强度指标 c_{cq} 、 φ_{cq} 代入朗肯土压力公式是一种错误的分析方法,由此导致了对水土合算土压力分析方法的误解。根据两种试验的原理,推导出了采用强度指标 c_{cu} 、 φ_{cu} 和 c_{cq} 、 φ_{cq} 表示的总强度 S_u ,进而依据“ $\varphi=0$ 法”,给出了基坑开挖卸载下正确的水土合算土压力公式。结合该公式,对行业规范中采用的一些土压力计算方法进行了评述,并结合算例结果对计算分析中几种强度指标的应用进行了评价。

关键词: 饱和黏性土;总强度;水土合算;土压力

中图分类号: TU471

文献标志码: A

Total Strength of Saturated Clay and Earth Pressure in Excavation by Total Stress Analysis Method

GAO Yanbin, YAO Tianjiao, YANG Zhengyuan

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on the review of the concept of total strength S_u and the principle of “ $\varphi=0$ method”, it is pointed out that directly substituting the strength parameters of c_{cu} and φ_{cu} by triaxial consolidated undrained shear test, and the strength parameters of c_{cq} and φ_{cq} by direct shear test into Rankine's earth pressure is a uncorrected analysis method. It results in the misleading of the application of the total stress analysis method. According to the principle of the two kinds of test, the formulations of total strength S_u using the strength parameters of c_{cu} , φ_{cu} , and c_{cq} , φ_{cq} are derived. Then, according to the principle of “ $\varphi=0$ method”, correct earth pressure equations applied to unloading condition in excavation are presented. Based on the new

equations, the analysis methods given in several domestic standards or specifications are discussed. Finally, different kinds of strength parameters in earth pressure analysis are evaluated with analysis examples.

Key words: saturated clay; total strength; total stress analysis; earth pressure

土压力计算是一个古老、复杂而实用性强的课题。经典的土压力理论包括朗肯土压力理论和库伦土压力理论,基坑工程中广泛采用朗肯土压力理论。朗肯土压力理论采用摩尔-库伦强度准则,推演出土体主动破坏和被动破坏两种极限平衡状态下的侧向土压力,分别被称为主动土压力和被动土压力。

主动土压力计算式如下所示:

$$p_a = \sigma_v K_a - 2c\sqrt{K_a}, K_a = \tan^2(45 - \varphi/2) \quad (1)$$

被动土压力计算式如下所示:

$$p_p = \sigma_v K_p + 2c\sqrt{K_p}, K_p = \tan^2(45 + \varphi/2) \quad (2)$$

式中: p_a 和 p_p 分别为主动土压力和被动土压力; c 和 φ 分别为摩尔-库伦强度准则的内聚力和内摩擦角; K_a 和 K_p 分别为主动土压力系数和被动土压力系数; σ_v 为计算点处的竖向应力。

饱和黏性土的工程分析方法有总应力分析法和有效应力分析法两大类,朗肯土压力计算公式也相应有两种形式:一种是基于总应力分析法的采用总强度指标表达的土压力公式,后面会详细阐述;另外一种是基于有效应力分析法的采用有效强度指标 c' 和 φ' 表达的土压力公式。采用有效应力分析法给出的朗肯土压力计算式如下所示:

$$p_a = \sigma'_v K_a - 2c'\sqrt{K_a} + u, K_a = \tan^2(45 - \varphi'/2) \quad (3)$$

收稿日期: 2019-10-31

基金项目: 国家自然科学基金(41972273)

第一作者: 高彦斌(1973—),男,副教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为软黏土力学特性与软土工程。

E-mail: yanbin_gao@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

$$p_p = \sigma'_v K_p + 2c' \sqrt{K_p} + u, K_p = \tan^2(45 + \varphi'/2) \quad (4)$$

式中: σ'_v 为有效竖向应力; c' 和 φ' 分别为有效内聚力和有效内摩擦角; u 为土体破坏时的孔压。采用有效应力分析法需要确定土体破坏时的孔压,增加了计算分析的难度。

对于饱和黏性土的总应力分析法,经典的方法为“ $\varphi=0$ 法”。“ $\varphi=0$ 法”中采用不排水剪切试验得到的总强度 S_u ,又称为不排水抗剪强度。由“ $\varphi=0$ 法”给出的朗肯主动土压力和被动土压力计算式分别如下所示:

$$p_a = \sigma_v - 2S_u \quad (5)$$

$$p_p = \sigma_v + 2S_u \quad (6)$$

“ $\varphi=0$ 法”基于的是不排水条件下软黏土的总强度 S_u 与应力路径无关的原理^[1-2]。关于该方法的原理以及总强度 S_u 的确定将在后面进一步阐述。

关于土压力分析方法,国内则有“水土分算”和“水土合算”两种方法(或称谓)。笔者在文献中未找到对这两种方法的明确的力学定义,国外文献中也未发现这样的称谓。从原理上看,土压力计算中的这种称谓可认为是“有效应力分析法”和“总应力分析法”的替代。对于饱和黏性土压力的总应力分析,国内对“ $\varphi=0$ 法”的深入研究并不多,更多是在朗肯土压力公式的基础上发展了采用三轴固结不排水强度指标 c_{cu} 、 φ_{cu} 和直剪固结快剪强度指标 c_{cq} 、 φ_{cq} 的计算公式。常见的一种方法是将这些强度指标直接代入式(1)和式(2),计算点处的竖向应力 σ_v 采用总应力。对于这种水土合算方法的争论长期以来一直没有间断过,该方法计算得到的主动土压力偏低而被动土压力偏大,因此不少人认为“水土合算缺乏理论依据”^[3-5],并对基于总应力分析法的水土合算土压力的正确性产生了质疑。

为了解决这个问题,沈珠江^[6]提出了“基于有效固结理论的土压力计算方法”,基本原理遵循了“ $\varphi=0$ 法”。首先建立了土的总强度 S_u 与三轴固结不排水剪切强度指标 c_{cu} 和 φ_{cu} 的关系,然后根据式(5)和式(6)推导出了以这些指标表达的垂直挡土墙上的主动和被动土压力公式。该文献中未对直剪固结快剪强度指标 c_{cq} 和 φ_{cq} 的应用进行研究。另外,由于推导过程中没有考虑基坑工程中的侧向卸载应力路径,给出的土压力计算公式并不适用于开挖卸载下的基坑工程土压力分析。

为了解决基坑工程中饱和黏性土的土压力计算问题,我国不少学者探索基于有效应力分析法的水土分算法的应用^[3,7-8]。近些年来,“水土分算法”的

发展引发了对饱和黏性土中的渗流以及水压力研究的重视^[8-10]。一些行业规范也规定采用水土分算法计算饱和黏性土的土压力,如上海市《基坑工程技术规范》(DG/TJ08-61—2018)^[11]明确规定采用水土分算法计算土压力,并分别给出了基坑内外水压力的计算方法。

综上所述,基于总应力分析法的水土合算在基坑工程中的应用受到了前所未有的挑战。然而,国内很少有文献对总应力分析的“ $\varphi=0$ 法”的原理和应用进行深入研究,大量的争论集中在朗肯土压力计算中强度指标 c_{cu} 、 φ_{cu} 与 c_{cq} 、 φ_{cq} 的应用上,缺乏对这两类强度指标的确定方法以及水土合算法的基本原理的分析讨论,并且不乏存在对总强度和总应力分析法(水土合算法)的基本概念和分析原理的误解。回顾了总强度的概念和总应力分析法的原理,在文献[6]的基础上,进一步研究采用固结不排水强度指标(c_{cu} 、 φ_{cu} 与 c_{cq} 、 φ_{cq})表示的适用于基坑工程的水土合算土压力公式,讨论国内规范中给出的几种土压力分析方法,并结合算例对不同的计算方法以及强度指标的应用进行对比。

1 总强度 S_u 与水土合算土压力

1.1 总应力分析的“ $\varphi=0$ 法”

先结合土的总强度概念来阐述总应力分析法和水土合算的基本原理。黏性土的渗透系数较低,从初始状态到剪切破坏可看作“不排水”剪切过程,室内试验中通常用不排水剪切试验来模拟这个过程。“不排水”是总应力分析法的基本假设,也是最重要的假设。不排水剪切试验得到的剪切破坏面上的总剪应力被称为总强度(或不排水抗剪强度),用 S_u 表示。三轴试验中,土样破坏时不同斜面上的剪应力是不同的,通常将破坏时45°斜面上的剪应力定义为总强度 S_u ,即:

$$S_u = \frac{1}{2}(\sigma_{1f} - \sigma_{3f}) = \frac{1}{2}q_f \quad (7)$$

式中: σ_{1f} 和 σ_{3f} 分别为土样破坏时的最大主应力和最小主应力; q_f 为破坏时的偏应力,均以总应力表示。注意总强度 S_u 并不是与有效强度线相切的(45°+ $\varphi'/2$)斜面(也就是真正的破坏面)上的剪应力。在直剪、单剪以及十字板剪切试验中, S_u 定义为破坏时剪切面上的剪应力。

饱和黏性土的总强度 S_u 主要取决于初始有效固结压力的大小,而与不排水剪切总应力路径的关系

不大。如图1所示的常规三轴试验,土样在有效固结应力 σ'_c 下固结后,进行以下三种不同应力路径下的不排水剪切: $O-S_1$ 代表轴向加载、围压不变; $O-S_2$ 代表轴向恒载,侧向卸载; $O-S_3$ 代表偏应力($q=\sigma_1-\sigma_3$)增加的任意应力路径。根据临界状态土力学理论,这三种总应力路径下的有效应力路径是唯一的,土样破坏时的偏应力 q_f 以及总强度 S_u 也是唯一的,但剪切过程中和破坏时的孔压是不同的(图1中, $O-S_1$ 产生正的孔压, $O-S_2$ 产生负的孔压)。总强度 S_u 的唯一性也是饱和黏性土临界状态土力学理论的一个重要推论,是在有效应力原理基础上形成总应力分析法的理论基础,并得到了试验验证^[1-2]。

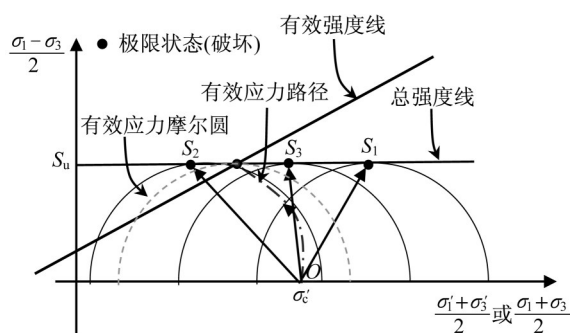


图1 饱和黏性土的总强度

Fig.1 Total strength of saturated clay

根据不排水条件下总强度唯一性原理,极限平衡性分析中的摩尔-库伦强度指标就可以采用 $c=S_u$ 和 $\varphi=0$,也就是所谓的“ $\varphi=0$ 法”。该方法不用关心不排水剪切过程中的总应力路径、孔压大小以及有效应力路径,仅需确定总应力大小以及总强度 S_u ,避开了不排水剪切破坏孔压的求解,已成为饱和黏性土极限平衡分析的重要手段。

总应力分析法的基本假设是“不排水”、渗透性低的饱和黏性土在施工工期较短(一般在几个月内)的情况下,该假设被数值模拟以及工程实践证明是合理的^[2]。当然,软土中的薄层砂土(千层饼)会导致水平向的渗透性增大,可能产生显著的渗流,这关系到另外一个课题。这里仅讨论满足“不排水”条件下的土压力计算问题。

1.2 基于总应力分析法的水土合算土压力

根据如图1所示的总强度概念,就可以推导出如式(5)和式(6)所示的两种极限平衡状态下的水土合算土压力表达式。主动土压力计算深度从坑外地表算起,被动土压力计算深度从坑底算起。另外,将总强度指标 $c=S_u$ 和 $\varphi=0$ 代入式(1)和式(2)所示的朗肯土压力公式,同样可以得到式(5)和式(6),其中

$K_a=K_p=1$ 。可以看出,采用总强度 S_u 表示的土压力公式简洁,只要给出随深度变化的竖向总应力 σ_v 以及总强度 S_u ,就可以得到作用于挡土结构随深度变化的主动土压力和被动土压力。

下面结合式(5)来进一步讨论主动土压力。当 $\sigma_v < 2S_u$ 时(通常出现在浅部几米的深度),采用式(5)计算得到的主动土压力小于零,代表土体侧向受到拉力才会破坏。由于挡土结构不可能对土体产生拉力,因此浅部土体不会处于极限状态,工程上常作土压力为零处理,但并不代表正常工作状态下的土压力为零。需要指出的是,采用式(5)和式(6)计算得到的土压力是两种极限状态下的土压力,并不完全等同于正常工作状态下作用于支撑结构上的土压力,工作状态土压力应在静止土压力和主动土压力之间。因此,不能因为现场测试到的土压力与计算结果的不同而否定后者的正确性。

假设基坑开挖过程中坑外地表标高不变,即坑外土体的竖向自重应力为初始竖向自重应力 σ_{v0} ,并且考虑地表超载 q ,则主动土压力公式(见式(5))可进一步表示为

$$(p_a)_{S_u} = (\sigma_{v0} + q) - 2S_u = (\sigma'_{v0} + u_0 + q) - 2S_u \quad (8)$$

式中: σ_{v0} 和 σ'_{v0} 分别为计算位置处的初始竖向自重应力的总应力和有效应力; u_0 为计算位置处的初始孔压,即静水压力,区别于如式(3)和式(4)所示的有效应力分析法中的孔压 u 。式(8)给出了几个有应用价值的结论,如下所示:

(1)超载 q 有多大,主动土压力就增加多大,超载对主动土压力的影响简洁明了。

(2)总强度 S_u 越大,主动土压力越小,土的强度对土压力的影响一目了然。

(3)总应力分析法给出的水土合算土压力公式中也可以包括有效应力和孔压,如式(8)中的 σ'_{v0} 和 u_0 ,这是总应力分解的结果。如果将水土分算和水土合算与总应力分析法和有效应力分析法分别对应,两者的本质区别在于计算原理和强度指标,而不是应力表达的方式或有没有孔压项。

1.3 强度比 S_u/σ'_c 及一些成果

饱和黏性土的总强度 S_u 与固结应力 σ'_c 的大小有关,同一个土层中的总强度随着深度的增大而增加。为了归一化固结应力或埋深对总强度的影响,饱和黏性土的总强度通常用强度比 S_u/σ'_c 表示,即总强度 S_u 与有效固结应力 σ'_c 的比值。土体原位处于 K_0 固结状态(天然土层在自重应力作用下,或在大面积荷载作用下所完成的固结),垂直方向和水平方向的有效

固结应力不相等,习惯上采用竖向有效固结应力 σ'_{v0} 来表示固结应力的 大小。强度比 S_u/σ'_{v0} 就成为饱和黏性土的一个重要强度指标,可由三轴试验、直剪试验、单剪试验、十字板剪切试验等方法获得。

为了配合“ $\varphi=0$ ”法的应用,在各种因素对 S_u/σ'_{v0} 的影响方面积累了丰富的研究成果,包括土的塑性、应力历史、各向异性、加载速率和试验方法等因素^[1-2,12-15]。原位 K_0 固结的土体强度具有明显的各向异性,导致试验得到的 S_u/σ'_{v0} 与试验采用的固结方式和剪切方式有关,总体上具有以下规律: K_0 固结三轴压缩试验(主动破坏) $>$ 直剪试验、单剪试验、十字板剪切试验 $> K_0$ 固结三轴拉伸试验(被动破坏)^[13-15]。由于土压力的大小与总强度 S_u 直接相关,通过对强度比 S_u/σ'_{v0} 的研究就可以方便地考虑土的塑性、应力历史、各向异性等因素对土压力的影响,这是采用其他强度指标难以实现的。

2 采用 c_{cu} 、 φ_{cu} 和 c_{cq} 、 φ_{cq} 表示的总强度 S_u 及水土合算土压力

根据前面给出的总应力分析法的基本原理,首先由强度指标 c_{cu} 、 φ_{cu} 和 c_{cq} 、 φ_{cq} 得到总强度 S_u , 然后再代入式(5)和式(6)得到采用这些强度指标表示的水土合算土压力公式。在后面的分析中可以看出,通过该方法给出的结果与将强度指标 c_{cu} 、 φ_{cu} 和 c_{cq} 、 φ_{cq} 直接代入朗肯土压力公式(见式(1)和式(2))是完全不同的。

2.1 直剪固结快剪指标 c_{cq} 和 φ_{cq} 的应用

由直剪固结快剪试验得到的土样破坏时的剪应力 τ_f 与有效固结应力 σ'_{v0} 的关系(即强度线)如图 2 所示。土样破坏时剪切面(水平面)上的剪应力 τ_f 即为总强度, 记为 S_{uq} 。根据这条强度曲线得到的内聚力 c_{cq} 和内摩擦角 φ_{cq} 如图 2 所示。

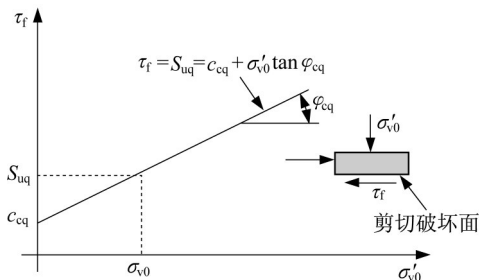


图2 直剪固结快剪试验强度线与总强度

Fig.2 Strength line and total strength of direct quick shear test

总强度 S_{ug} 与 c_{cg} 和 φ_{cg} 的关系可表示为

$$\tau_f = S_{uq} = c_{cq} + \sigma'_{v0} \tan \varphi_{cq} \quad (9)$$

将式(9)代入式(5)和式(6)中,就可以得到采用 c_{cq} 和 φ_{cq} 表示的水土合算土压力公式,如下所示:

$$(p_a)_{\text{cq}} = \sigma_v - 2S_u = \sigma_v - 2(c_{\text{cq}} + \sigma'_{v0} \tan \varphi_{\text{cq}}) \quad (10)$$

$$(p_p)_{cq} = \sigma_v + 2S_u = \sigma_v + 2(c_{cq} + \sigma'_{v0} \tan \varphi_{cq}) \quad (11)$$

同样,如果基坑开挖过程中坑外地面标高未发生变化,即坑外土体的 $\sigma_v=\sigma'_{v0}$,并且考虑超载 q ,则主动土压力公式可进一步表示为

$$(p_a)_{\text{cq}} = q + \sigma_{v0} - 2(c_{\text{cq}} + \sigma'_{v0} \tan \varphi_{\text{cq}}) = q + u_0 + \sigma'_{v0}(1 - 2 \tan \varphi_{\text{cq}}) - 2c_{\text{cq}} \quad (12)$$

显然,这个结果与直接将 c_{eq} 和 φ_{eq} 代入式(1)和式(2)得到的结果是完全不同的。

2.2 三轴固结不排水指标 c_{cu} 和 ϕ_{cu} 的应用

如图3所示的常规三轴固结不排水剪切(即三轴CU)试验。土样的有效固结应力(有效围压)为 σ'_c ,初始孔压为零,总固结应力 $\sigma_c = \sigma'_c$ 。固结后轴向加载进行不排水剪切至土样破坏,破坏时的轴压为 σ_{vf} ,则该土样的总强度

$$S_{\text{ucu}} = \frac{1}{2} (\sigma_{\text{vf}} - \sigma'_{\text{c}}) \quad (13)$$

式中: S_{UCU} 为由三轴 CU 试验得到的不排水抗剪强度。在不同的有效固结应力下进行一组试验,绘制土样破坏时的摩尔圆(如图 3 中的 1 号摩尔圆),这些摩尔圆的切线即为抗剪强度线,表达式为

$$\tau_f = c_{cu} + \sigma_{nf} \tan \varphi_{cu} \quad (14)$$

式中: σ_{nf} 为破坏面(角度为 $(45^\circ + \varphi')$)上的正应力(总应力)。注意式(14)中的 σ_{nf} 不是有效固结应力 σ'_c , τ_f 也不是 S_{nf} (见图3)。

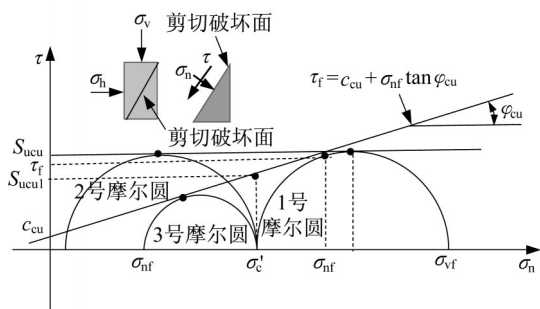


图3 常规三轴CU试验强度线与总强度

Fig.3 Strength line and total strength of triaxial CU test

由图3中的1号摩尔圆、破坏面上的剪应力 τ_f 以及总强度 S_{cu} 之间的关系可以得到采用 c_{cu} 和 φ_{cu} 表示的总强度 S_{cu} ,计算式如下所示:

$$S_{\text{ucu}} = \frac{1}{2} \left(\left(\sigma'_c \frac{1 + \sin \varphi_{\text{cu}}}{1 - \sin \varphi_{\text{cu}}} + 2c_{\text{cu}} \frac{\cos \varphi_{\text{cu}}}{1 - \sin \varphi_{\text{cu}}} \right) - \sigma'_c \right) \quad (15)$$

或

$$S_{\text{ucu}} = \frac{1}{2} ((\sigma'_c K_p + 2c_{\text{cu}} \sqrt{K_p}) - \sigma'_c) \quad (16)$$

$$K_p = \tan^2(45 + \varphi_{\text{cu}}/2)$$

有些文献中给出的总强度关系式为

$$S_{\text{ucul}} = c_{\text{cu}} + \sigma'_c \tan \varphi_{\text{cu}} \quad (17)$$

按照式(17)计算得到的不排水抗剪强度 S_{ucul} 如图3所示。式(17)看上去合理,其实是不严谨的。从图3给出的关系可以看出, $S_{\text{ucul}} < S_{\text{ucu}}$, 按式(17)得到的总强度偏小。

假设进行轴向压力恒定、侧向卸荷的不排水剪切,也就是坑外土体的应力路径。根据前面提到的总强度不变的原则,总强度仍然为 S_{ucu} , 因此破坏时的摩尔圆为图3中的2号摩尔圆,而不是与强度线相切的3号摩尔圆。这样,采用轴向加载试验得到的不排水抗剪强度 S_{ucu} 仍然适用于侧向卸载下的土压力计算,将式(15)和式(16)代入式(8)就可以得到主动土压力,如下所示:

$$(p_a)_{\text{cu}} = q + \sigma_{v0} - ((\sigma'_c K_p + 2c_{\text{cu}} \sqrt{K_p}) - \sigma'_c) \quad (18)$$

如果试验采用的 σ'_c 与原位竖向有效固结应力相同,即 $\sigma'_c = \sigma'_{vc}$, 则式(18)可进一步转化为

$$(p_a)_{\text{cu}} = q + u_0 + \sigma'_{v0}(2 - K_p) - 2c_{\text{cu}} \sqrt{K_p} \quad (19)$$

对于坑内土体,开挖过程中竖向应力减小、侧向应力增大,类似于三轴拉伸试验。假设不排水抗剪强度 S_{ucu} 不变,将式(15)和式(16)代入式(6),得到坑内土体被动土压力,如下所示:

$$(p_p)_{\text{cu}} = \sigma_v + ((\sigma'_{v0} K_p + 2c_{\text{cu}} \sqrt{K_p}) - \sigma'_{v0}) \quad (20)$$

2.3 评述

式(12)和式(18)~(20)给出了采用强度指标 c_{cu} 、 φ_{cu} 和 c_{cq} 、 φ_{cq} 表示的水土合算土压力公式,可以看出以下特征:

(1)这些公式的形式与式(1)和式(2)完全不同。由于试验原理的不同,因此采用指标 c_{cu} 、 φ_{cu} 与采用指标 c_{cq} 、 φ_{cq} 的计算公式也有较大差别,并不仅仅是计算指标的不同。

(2)主动土压力公式中均有 $(q + u_0)$ 这一项,从理论上给出了超载和地下水对主动土压力的影响,这也是总应力分析法的理论成果。

(3)相比而言,采用总强度 S_u 的计算公式(见式(5)、式(6)和式(8)),即经典的“ $\varphi=0$ 法”土压力公

式更为简洁明了,应用更为方便。

3 行业规范计算方法及评述

3.1 国家规范 JGJ 120—2012

我国《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—2012)^[16]中规定采用水土合算法计算饱和黏性土的土压力,计算式如下所示:

$$p_a = (\sigma_{v0} + q)K_a - 2c\sqrt{K_a}, K_a = \tan^2(45 - \varphi/2) \quad (21)$$

$$p_p = \sigma_v K_p + 2c\sqrt{K_p}, K_p = \tan^2(45 + \varphi/2) \quad (22)$$

c 和 φ 为三轴固结不排水剪切得到的强度指标,即 c_{cu} 、 φ_{cu} , 并规定有经验时可以采用直剪固结快剪强度指标 c_{cq} 、 φ_{cq} 。该计算公式被不少地方规范所采用,如山西省《建筑基坑工程技术规范》(DBJ04/T306—2014)^[17]和湖北省《基坑工程技术规程》(DB42/T 159—2012)^[18]。

式(21)和式(22)显然是直接将强度指标 c_{cu} 、 φ_{cu} 和 c_{cq} 、 φ_{cq} 套用到式(1)和式(2)来分别求解主动土压力和被动土压力。前面已经指出,这种做法看上去是合理的,其实缺乏理论依据,并不是总应力分析法的真正结果。然而,该处理方法非常普遍,不少文献中将此作为水土合算的正确结果来分析、讨论与评判^[3,7,19-20]。式(21)给出的主动土压力公式可以进一步转化为

$$p_a = (\sigma'_{v0} + q)K_a - 2c\sqrt{K_a} + u_0 K_a, K_a = \tan^2(45 - \varphi/2) \quad (23)$$

式(23)中的 $u_0 K_a$ 项成为众多学者质疑水土合算法合理性的主要原因。由于 $K_a < 1$, 因此认为水土合算法低估了孔压 u_0 对主动土压力的影响,导致计算得到的主动土压力偏小。然而,诸多争论针对的是一个理论依据不足的计算公式,不足以因此而否定总应力分析法和水土合算土压力的科学性。对比式(8)和式(23)可以看出,其实式(21)不仅会低估孔压 u_0 对主动土压力的影响,还会低估地表超载 q 对主动土压力的影响。

3.2 广东规范 DBJ/T15-20—2016

广东省《建筑基坑工程技术规程》(DBJ/T 15—20—2016)^[21]规定“透水性弱的土可按水土合算法计算侧压力”。虽然规范中给出的土压力计算公式与国家规范的完全相同,但是采用了不同的计算参数:“1、淤泥及淤泥质土应采用有效自重应力下预固结的三轴不固结不排水抗剪强度指标;2、正常固结

的饱和黏性土应采用在土的有效自重应力下预固结的三轴不固结不排水(三轴UU)抗剪强度指标。”对于三轴UU强度指标 c_{uu} 和 φ_{uu} ,由于 $c_{uu} \approx S_u$ 、 $\varphi_{uu} \approx 0$,因此 $K_a \approx 1$ 、 $K_p \approx 1$,其结果与式(5)、式(6)和式(8)接近。采用三轴UU强度指标 c_{uu} 和 φ_{uu} 的弊端在于,由于每层土采用一组平均值,并且 $\varphi_{uu} \approx 0$,同一土层采用一个固定的 c_{uu} 或 S_u 来计算土压力,因此无法反映同一土层总强度以及土压力随深度的变化。另外,取土扰动对三轴UU试验结果影响很大,导致试验结果存在较大的离散性。

3.3 上海规范DG/TJ08-61—2018

上海市《基坑工程技术规范》(DG/TJ08-61—2018)^[11]规定采用“水土分算法”计算土压力,给出的土压力(包括水压力)计算式如下所示:

$$p_a = (\sigma'_{v0} + q)K_a - 2c\sqrt{K_a} + u, K_a = \tan^2(45 - \varphi/2) \quad (24)$$

$$p_p = \sigma'_v K_p + 2c_{cu}\sqrt{K_{ph}} + u \quad (25)$$

$$K_p = \frac{\cos^2 \varphi}{\left(1 - \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta)\sin \varphi}{\cos \delta}}\right)^2}$$

$$K_{ph} = \frac{\cos^2 \varphi \cos^2 \delta}{(1 - \sin(\varphi + \delta))^2} \quad (26)$$

式中: δ 为围护结构与土体的摩擦角。规范中规定强度参数取“三轴固结不排水剪切试验测定的峰值强度指标 c_{cu} 、 φ_{cu} 或直剪固结快剪试验峰值强度指标 c_{cq} 、 φ_{cq} ”。

条文说明中这样解释:“水土合算方法与土力学

基本原理相背,计算中低估了主动状态的水压力而高估了被动状态中的水压力作用,偏于不安全……水土分算概念清楚……当无条件取得有效计算剪强度指标时,可以采用总应力固结不排水强度指标按水土分算方法进行计算……”。对比式(23)和式(24)可以看出,在主动土压力计算上,上海规范水土分算与国家规范水土合算的差别仅在孔压这一项上,将国家规范中的 $u_0 K_a$ 替换为 u ,由此可以得到一个较大的主动土压力。这样处理可能使计算结果与实际情况较为一致。然而,将总强度指标应用于水土分算中,容易造成概念上的混乱。由此出现了所谓的“狭义的水土合算”—上海规范法和“广义的水土合算”—国家规范法的复杂且混乱的称谓^[22]。

4 算例分析

下面结合一个算例来对比采用不同强度指标下国家规范法、上海规范法和本方法的土压力计算结果,这些强度指标包括三轴 c_{cu} 、 φ_{cu} ,三轴 c_{uu} 、 φ_{uu} ,直剪 c_{cq} 、 φ_{cq} ,十字板 S_u ,静力触探 S_u 。某地铁基坑处于古河道沉积区,深度40 m以内为性质较均匀的软土层,大部分为软塑、流塑状态,地下水位埋深1 m。表1给出了该场地勘察报告给出的主要土层分布、三种试验(直剪固结快剪、三轴CU、三轴UU)得到的强度指标 c 、 φ 以及由内摩擦角 φ 计算得到的朗肯土压力系数 K_a 和 K_p 。可以看出,三轴CU的强度指标要略大于直剪固结快剪指标,因此给出的土压力系数 K_a 略小而 K_p 略大。

表1 主要地层参数

Tab. 1 Parameters of soil layers

土层名称	埋深/m	直剪固结快剪				三轴CU				三轴UU			
		c_{cq}	φ_{cq}	K_a	K_p	c_{cu}	φ_{cu}	K_a	K_p	c_{uu}	φ_{uu}	K_a	K_p
③层淤泥质粉质黏土	4.2~9.8	11.8	15.4	0.58	1.72	13.0	12.5	0.64	1.55	29.5	1.2	0.96	1.04
④层淤泥质黏土	9.8~17.6	10.6	10.7	0.68	1.46	12.4	13.1	0.63	1.58	22.3	0.8	0.97	1.03
⑤层粉质黏土	17.6~35.0	14.3	13.8	0.61	1.63	16.5	15.0	0.58	1.70	55.4	1.4	0.95	1.05

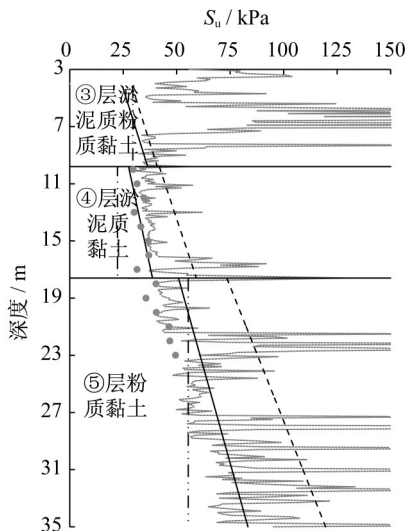
图4给出了由三种强度指标 c 、 φ 计算得到的总强度 S_u 随深度的变化,其中直剪固结快剪强度采用式(9)计算,三轴CU强度采用式(15)和式(16)计算,三轴UU强度近似取 c_{uu} 。除此之外,图4还给出了由原位十字板剪切试验以及双桥静力触探试验得到的 S_u 随深度的变化。双桥静力触探总强度 S_u 的计算方法为

$$S_u = (q_c - \sigma_v)/N_c \quad (27)$$

式中: q_c 为锥尖阻力; σ_v 为总上覆应力; N_c 为系数(对

于软黏土,一般取10)。从图4可以看出,直剪固结快剪试验得到的强度与两种原位测试方法的较为接近,而三轴CU明显偏大。尽管直剪固结快剪和三轴CU的强度指标差别较小,但两者得到的 S_u 在深度可以高达几十千帕。不同试验间的差别与前面关于软黏土总强度介绍中给出的规律一致,该差别主要是由于各向异性造成的。由于三轴UU指标 c_{uu} 为土层的平均值,因此计算结果不能反映同一土层中 S_u 随深度逐渐增大的规律。图5给出了由静力触探结果进一步整理得到的强度比 S_u/σ'_v 随深度的变化。

强度比随着深度的增加而逐渐减小,超过15 m后基本稳定在0.27左右,表明由浅层的超固结状态逐渐过渡到正常固结状态。显然,静力触探试验给出的结果更为丰富详实。



—静力触探 —直剪固结快剪 ----三轴CU ———三轴UU • 十字板

图4 总强度 S_u

Fig.4 Total strength S_u

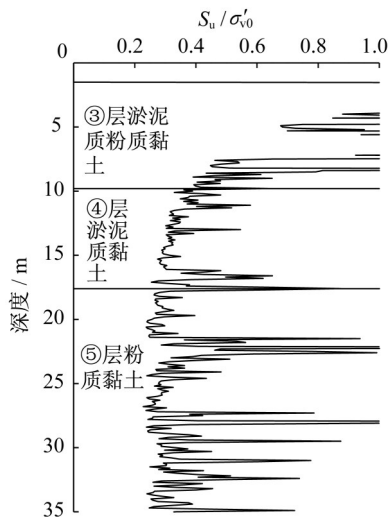


图5 强度比 S_u/σ'_v

Fig.5 Strength ratio S_u/σ'_v

假定开挖深度为15 m,不考虑渗流作用和地表超载的影响,采用三轴CU指标(c_{cu} 、 φ_{cu})和直剪固结快剪指标(c_{cq} 、 φ_{cq}),分别依据国家规范法(见式(21)和式(22))、上海规范法(见式(24)和式(25)), δ 取 0.7φ 以及本方法给出的公式(见式(10)~(12)和式(18)~(20))计算主、被动土压力 p_a 和 p_p 。另外,还根据静力触探试验结果,深度 $H < 15$ m取 $S_u = 37$ kPa,深度 $H > 15$ m取 $S_u/\sigma'_v = 0.27$,采用经典“ $\varphi = 0$ 法”(见式(5)、式(6)和式(8))计算主、被动土压力。所

有这些计算结果如图6和图7所示。

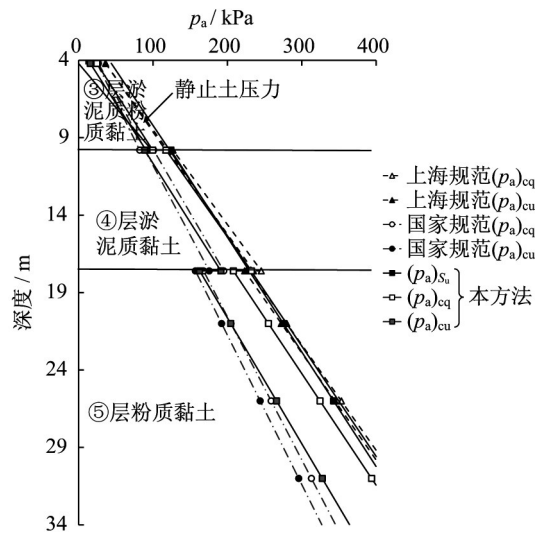


图6 主动土压力

Fig.6 Active earth pressures

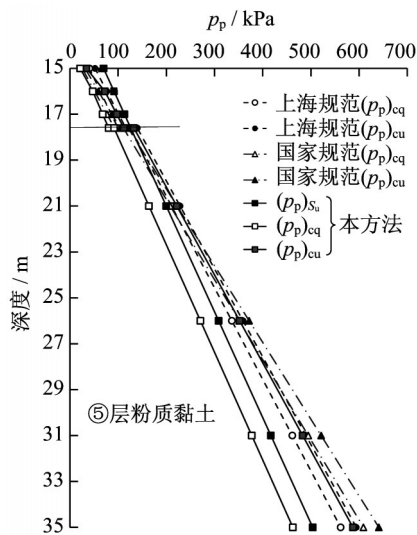


图7 被动土压力

Fig.7 Passive earth pressures

从计算结果来看,国家规范法给出的主动土压力最小而被动土压力最大;上海规范法给出的主动土压力与本方法中采用静力触探 S_u 和直剪固结快剪指标的结果接近。注意,土压力也均与采用 $K_0 = 0.53$ 计算得到的静止土压力接近,表明由静止土压力状态转变为主动土压力状态的侧压力变化并不大,这也是软黏土主动土压力的一个重要特征。对于被动土压力,当采用常规三轴CU指标时,上海规范采用的较为复杂的水土分算法的结果和本方法给出的结果差别并不大。

从三轴CU和直剪固结快剪两套指标的计算结果对比来看,各种方法采用三轴CU指标得到的主动

土压力较小而被动土压力较大,这种差别在本方法的计算结果中尤其显著。原因是本方法基于总强度 S_u ,能够反映不同试验得到的差别较大的总强度(见图1)对土压力的影响,而国家规范法和上海规范法是基于强度指标 c 和 φ ,强度指标的细微变化对土压力系数 K_a 、 K_p 以及土压力计算结果的影响不大。

5 结论与建议

只要开挖过程中渗透性低的软黏土固结可忽略,近似满足不排水的条件,就可以用“ $\varphi=0$ 法”总应力分析法来分析基坑的土压力,不应以土压力公式中是否存在孔压来区别“水土分算法”和“水土合算法”。由于应力分解,总应力分析法给出的水土合算土压力公式中亦可出现水压力分项。回归“总应力分析法”和“有效应力分析法”的称谓可能更为简单明了。

直接将强度指标 c_{cu} 、 φ_{cu} 与 c_{cq} 、 φ_{cq} 代入朗肯土压力公式缺乏理论依据,由此导致了对总应力分析法以及水土合算土压力的误解。本研究给出的采用强度指标 c_{cu} 、 φ_{cu} 和 c_{cq} 、 φ_{cq} 表示的适用于基坑工程的水土合算土压力公式可以简单有效地考虑地表超载和地下水位对土压力的影响,并不存在“主动土压力偏小和被动土压力偏大”的现象。本研究的目的并不是为了推广这种方法,而是为了阐明目前的研究中对总应力分析法的误解和误用。

笔者仍然建议采用经典的“ $\varphi=0$ 法”计算公式。有必要重视对这种经典方法在软黏土地区基坑工程中应用的研究,并应该重视土的强度比 S_u/σ'_c 这一参数的室内试验尤其是原位测试成果的积累。通过对该参数的研究,可以方便地考虑埋深、土的塑性、应力历史以及各向异性等因素对土压力的影响。由于各向异性,不同试验得到的 S_u/σ'_c 差别较大,因此有必要结合工程实践研究土压力计算中总强度的合理取值问题。

参考文献:

- [1] TERZAGHI K, PECK R B, MESRI G. Soil mechanics in engineering practice [M]. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1996.
- [2] 布兰德 E W, 布伦纳 R P. 软黏土工程学[M]. 北京:中国铁道出版社,1991.
BRAND E W, BRENNER R P. Soft clay engineering [M]. Beijing: China Railway Press, 1991.
- [3] 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.
WEI Rulong. Several problems of calculating earth pressure by total stress method [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(6): 120.
- [4] 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.
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.
- [5] 宋二祥. 试论有效应力法与总应力法的应用[J]. 地基处理, 2001, 12(1): 64.
SONG Erxiang. The application of effective stress method and total stress method [J]. Ground Improvement, 2001, 12(1): 64.
- [6] 沈珠江. 基于有效固结应力理论的黏土土压力公式[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(3): 353.
SHEN Zhujiang. Earth pressure of clay based on effective consolidation stress theory [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(3): 353.
- [7] 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.
YANG Xiaojun, GONG Xiaonan. Calculation of earth pressure on excavation considering pore water pressure [J]. China Civil Engineering Journal, 1997, 30(4): 58.
- [8] 徐日庆, 张庆贺, 刘鑫, 等. 考虑渗透性的水-土压力计算方法[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(5): 961.
XU Riqing, ZHANG Qinghe, LIU Xin, et al. Methods for calculating soil-water pressure considering permeability [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(5): 961.
- [9] 王洪新. 水土压力分算与合算的统一算法[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(5): 1057.
WANG Hongxin. Unified method of separate and combined calculation of water and earth pressures [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(5): 1057.
- [10] 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.
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.
- [11] 上海市勘察设计行业协会. 基坑工程技术规范: DG/TJ08-61—2018 [S]. 上海: 上海市城乡建设和交通委员会, 2010.
Shanghai Exploration and Design Trade Association. Technical code for excavation engineering: DG/TJ08-61—2018 [S]. Shanghai: Shanghai Urban-Rural Development and Transportation Commission, 2010.
- [12] 高彦斌, 陈忠清. 基于原位十字板强度的沿海地区软黏土超固结比分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(2): 2572.
GAO Yanbin, CHEN Zhongqing. Analysis of the OCR of soft clay in coastal areas based on field vane strength [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(2):

- 2572.
- [13] MAYNE P W. Stress anisotropy effects on clay strength [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1985, 111(3): 356.
- [14] 王江峰. 上海软黏土结构性对其力学特性影响的试验研究 [D]. 上海: 同济大学, 2009.
- WANG Jiangfeng. Experimental study on the influence of the structure of Shanghai soft clay on its mechanical properties [D]. Shanghai: Tongji University, 2009.
- [15] 高彦斌. 两种 K_0 固结土样的归一化强度及其各向异性对比 [J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2019, 47(5): 634.
- GAO Yanbin. Normalized strength and strength anisotropy of two kinds of K_0 consolidated specimens [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2019, 47(5): 634.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑基坑支护技术规程: JGJ 120—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations: JGJ 120—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [17] 山西省住房和城乡建设厅. 建筑基坑工程技术规范: DBJ04/T306—2014 [S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2014.
- Department of Housing and Urban-Rural Development of Shanxi Province. Technical code for building foundation excavations: DBJ04/T306—2014 [S]. Beijing: China Building Materials Press, 2014.
- [18] 湖北省住房和城乡建设厅. 基坑工程技术规程: DB42/T 159—2012 [S]. 武汉: 湖北省住房和城乡建设厅, 2012.
- Department of Housing and Urban-Rural Development of Hubei Province. Technical specification for excavation engineering: DB42/T 159—2012 [S]. Wuhan: Department of Housing and Urban-Rural Development of Hubei Province, 2012.
- [19] 蒋洪胜, 刘国彬. 基坑主动区土压力计算模式的分析研究 [J]. *山东建筑工程学院学报*, 1998, 13(2): 16.
- JIANG Hongsheng, LIU Guobin. Study on the model of active-zone soil pressure in deep excavation [J]. *Journal of Shandong Institute of Architecture and Engineering*, 1998, 13(2): 16.
- [20] 叶国良, 张敬, 苗中海. 浅析“水土合算” [J]. *中国港湾建设*, 2004, 128(1): 15.
- YE Guoliang, ZHANG Jing, MIAO Zhonghai. Analysis of combined calculation of water and soil and cases studies [J]. *China Harbour Engineering*, 2004, 128(1): 15.
- [21] 广东省住房和城乡建设厅. 建筑基坑工程技术规范: DBJ 15—20—2016 [S]. 北京: 中国城市出版社, 2016.
- Department of Housing and Urban-Rural Development of Guangdong Province. Technical specification for building foundation excavation: DBJ 15—20—2016 [S]. Beijing: China City Press, 2016.
- [22] 韩红霞, 窦明远, 王喜燕, 等. 基坑支护中水土压力合算与分算综合分析 [J]. *河南工业大学学报*, 2002, 31(6): 62.
- HAN Hongxia, DOU Mingyuan, WANG Xiyan, *et al.* The comprehensive analysis of water and earth pressures together and separately on supporting pit [J]. *Journal of Hebei University of Technology*, 2002, 31(6): 62.
- design of steel structures, Part 1.2, general rules-structural fire design [S]. London: British Standards Institution, 2005.
- [20] 冯程远, 李国强, 蒋彬辉. 钢材高温材性模型对火灾下钢框架结构倒塌模拟的影响研究 [J]. *工程力学*, 2019, 36(12): 24.
- FENG Chengyuan, LI Guoqiang, JIANG Binhui. The influence of high-temperature material model of steel on the simulation of collapse of steel frame structure under fire [J]. *Engineering Mechanics*, 2019, 36(12): 24.
- [21] 建筑钢结构防火技术规范: GB51249—2017 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2017.
- Code for fire safety of steel structures in buildings: GB51249—2017 [S]. Beijing: China Planning Press, 2017.
- [22] 钢结构设计标准: GB50017—2017 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- Standard for design of steel structures: GB50017—2017 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.
- [23] USMANI A S, CHUNG Y C, TORERO J L. How did the WTC towers collapse: a new theory [J]. *Fire Safety Journal*, 2003, 38(6): 501.
- [24] 建筑设计防火规范: GB50016—2018 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- Code for fire protection design of buildings: GB50016—2018 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.
- [25] JIANG J, WANG C H, LOU G B, *et al.* Quantitative evaluation of progressive collapse process of steel portal frames in fire [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2018, 150: 277.
- [26] 门式刚架轻型房屋钢结构技术规范: GB51022—2015 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- Technical code for steel structure of light-weight building with gabled frames: GB51022—2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.

(上接第1282页)