

考虑土体有限宽度的邻近建筑基坑土压力计算方法

梁发云¹, 华建¹, 李林², 李明广³, 徐中华⁴

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 长安大学公路学院, 西安 710064; 3. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240;
4. 华东建筑设计研究院有限公司 上海地下空间与工程设计研究院, 上海 200002)

摘要: 基于极限平衡法建立土体受力平衡方程, 得到有限宽度土体土压力理论解答, 然后研究了土体宽高比、土体黏聚力、土体内摩擦角、墙土摩擦角等因素对土压力的影响规律, 最后通过分析影响土体破坏夹角的关键因素得到墙后土压力简化计算公式。结果表明, 在土体有限宽度条件下, 同等高度处土楔体前后受力基本相同, 土体内摩擦角对土压力的影响较大, 土体黏聚力和墙土摩擦角对土压力的影响不大。土体破坏夹角大致在朗肯与库伦计算角度之间变化, 墙土摩擦角、土体内摩擦角对滑裂面夹角及有限土压力计算范围均有显著影响。

关键词: 基坑工程; 邻近建筑基础; 有限土体; 土压力; 土体破坏夹角

中图分类号: TU432

文献标志码: A

Calculation Method of Earth Pressure in Adjacent Building Foundation Excavations Considering Finite Soils

LIANG Fayun¹, HUA Jian¹, LI Lin², LI Mingguang³, XU Zhonghua⁴

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Highway College, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 3. School of Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 4. Shanghai Underground Space Engineering Design & Research Institute, East China Architecture Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200002, China)

Abstract: Based on the limit equilibrium method, force balance equations of the soil were established to derive the theoretical solution of soil pressures for soils with finite width. Then, the effect of factors, such as the width-height ratio of the soil, soil cohesion, internal friction angle of the soil, and wall-soil friction angle on soil pressure, was investigated. By analyzing the key factors affecting the inclination angle of soil failure, a simplified formula for calculating the soil pressure behind wall was developed. The

results indicate that under the condition of the finite soil width, the forces on the front and back of soil wedges at the same height are basically the same. The internal friction angle of the soil significantly influences the soil pressure, while the impact of the soil cohesion and wall-soil friction angle is relatively minor. The inclination angle of soil failure varies approximately between the angles calculated by Rankine and Coulomb theories. Moreover, the wall-soil friction angle and the internal friction angle of the soil have significant effects on the sliding surface angle and the calculation range of finite soil pressures.

Keywords: excavation engineering; adjacent building foundation; finite soils; earth pressure; inclination angle of soil failure

随着城市建设的快速发展, 地下空间开发的力度不断加大, 中心城区基坑周围往往存在密集的既有建筑物, 当基坑与既有建筑物距离较近时, 基坑挡土墙后滑动土楔体的滑裂面可能被既有建筑物基础截断, 不能形成完整的滑裂面, 这与传统的朗肯或库伦土压力理论的计算假定不符。朗肯或库伦土压力理论假定极限状态下墙后土体滑裂面是完整的三角形分布, 但当墙后土体宽度 b 过小时 ($b < H \cot \theta$, H 为土体滑裂面起点至地面高度, θ 为滑裂面夹角), 由于既有建筑基础的存在, 导致滑裂面可能由三角形变为梯形。此时, 若仍采用朗肯或库伦土压力理论计算, 则使基坑支护设计的土压力与实际不符。

有限宽度土体土压力问题的研究始于筒仓填料土压力, Janssen^[1] 基于微元体极限平衡分析法研究了有限宽度土压力问题。Frydman 等^[2] 和 Take 等^[3] 通过离心模型试验研究了刚性挡土墙后有限土体土压力, 验证了 Janssen 计算理论的合理性, 在有限宽

收稿日期: 2024-01-25

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0800200)

第一作者: 梁发云, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为土力学与基础工程。E-mail: fyliang@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

度土体条件下挡墙土压力与墙后填土宽高比、墙土摩擦角以及土体内摩擦角有着直接的联系,而填土前后两侧墙土摩擦角 δ_1 与 δ_2 的差异对土压力影响较小。在此基础上,Kniss等^[4]、Yang等^[5]研究了斜坡或墙体前有限空间内加筋体挡土墙上土压力分布以及填土宽高比对土压力的影响。Hu等^[6]实测了不同挖掘深度下有限土体土压力,基坑深度对有限土体土压力影响较大,黏聚力和内摩擦角对土压力的影响较小。Fan等^[7]采用二维有限差分模型模拟邻近岩体表面挡土墙上主动土压力,阐明了研究有限宽度土压力的必要性。Greco^[8-9]认为墙后会出现多道滑裂面,并采用极限平衡法推导了有限宽度土体土压力分布的计算公式,但当滑裂面数量较多时无法得到土压力表达式。Liao等^[10]提出了计算有限宽度黏性土体土压力的解析解,假定滑裂面夹角为 $(45^\circ + \varphi/2)$,其中 φ 为土体内摩擦角,但与实际情况不符。国内对于有限宽度土体的研究起步较晚。高印立^[11]提出了一种基于塑性上限理论的土压力计算公式,北京市地方规范也采用类似方法计算有限土体土压力^[12],但忽略了墙土摩擦力,与实际情况存在差别。方焘等^[13]和蔡叶澜^[14]通过模型试验探究了不同位移下主动土压力分布。马平等^[15]基于极限平衡理论得到了有关计算公式,但忽略了邻近既有地下室侧的侧压力。应宏伟等^[16]采用极限平衡法对 n 个方程进行微分并联立求解得到了滑裂面夹角,但求解过程较为繁琐,不便于工程人员的直接应用。

目前基坑规范对有限宽度土压力计算存在不足,本文考虑土体黏聚力与墙土摩擦力,建立了简化模型。基于极限平衡法提出有限宽度土体土压力计算方法,探讨有限土压力与土性、墙土宽高比的关系,确定影响土体破坏角度的关键因素,并提出工程应用的简化方法。

1 有限土压力力学模型

1.1 有限土压力作用范围

对于紧邻建筑基坑开挖工程,日本的《城市铁路结构物邻近施工对策手册》^[17]将基坑开挖的影响区域划分为3类:无影响区、需要注意区和必须采取对策区。对水平距离既有建筑物基础宽度2倍以内、纵向深度沿着 $(45^\circ + \varphi/2)$ 斜线向下延伸的区域必须采取应对措施。对实际破坏土体^[18]进行分析后发现,当墙后土体宽度满足 $b < H \cot \theta$ 时,墙后土体滑裂面被既有建筑物基础截断。此时,深度 z 范围

内($z \leq H$)土压力强度应按有限宽度土体计算。

1.2 简化模型计算

本文采用极限平衡法计算有限土体在刚性挡墙平动模式下达到极限状态时的土压力,计算模型与受力分析如图1所示。采用水土分算进行计算,假定挡土墙为刚性,墙后滑裂土楔体为梯形,有限土体土压力分布形式为沿墙高的三角形分布。

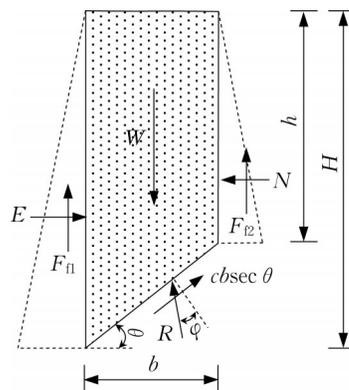


图1 有限土体计算模型

Fig.1 Calculation model of finite soil

挡土墙与已有建筑基础的距离为 b ,挡土墙高为 H ,邻近既有建筑基础一侧土楔体高为 h ,滑裂面夹角为 θ ,土楔体重力为 W 、黏聚力为 c 、内摩擦角为 φ ,挡土墙与既有基础作用于有限土体的水平合力分别为 E 、 N ,竖向合力分别为 F_n 、 F_{t2} ,对应墙土摩擦角分别为 δ_1 、 δ_2 ,下方土体反力为 R 。

根据水平与竖向极限平衡状态以及土压力极值条件可构建以下3个方程:

$$\begin{cases} E + bc = N + R \sin(\theta - \varphi) \\ F_n + F_{t2} + bc \tan \theta + R \cos(\theta - \varphi) = W \\ \frac{\partial E}{\partial \theta} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

未知量包含 E 、 R 、 N 、 θ 共4个,因此需要结合具体工况简化未知量数目。

1.3 土体前后侧受力简化

既有研究结果^[19-21]表明, h 高度处两侧土压力合力近似相等。为了进一步验证假设的合理性,进行了大量Abaqus有限元数值验证。选用摩尔-库伦本构模型,以 $H=21.5$ m, $\varphi=30^\circ$, $c=10$ kPa,土体重度 $\gamma=20$ kN \cdot m $^{-3}$, $\delta_1=\delta_2=\varphi/2$ 为例,此时墙后土体最大宽高比(b/H)约为0.65,主动状态下土楔体前后侧压力如图2所示。

由图2可知,主动状态下,不同宽高比、土性条件下土楔体前后侧所受合力几乎相等,被动状态下

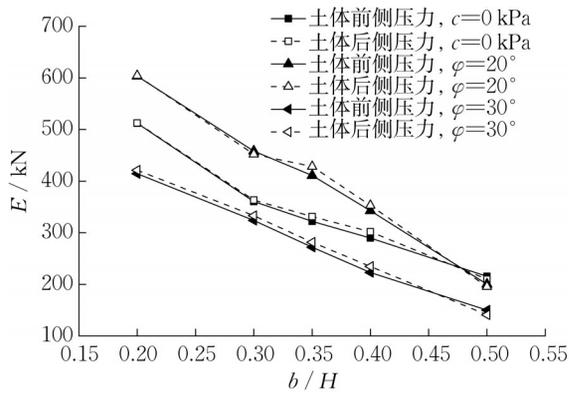


图2 主动状态下土楔体前后侧压力

Fig.2 Front and rear force of soil wedge under active state

也可得到相同结论。未知参量 N 、 E 的关系可由图 1 中对应土压力面积的几何关系表示,两者比例系数为

$$\eta = \frac{N}{E} = \left(\frac{h}{H}\right)^2 \quad (2)$$

2 理论公式推导

2.1 主动状态

主动状态受力分析如图 3 所示。由于土体黏聚力的存在,极限状态时上部土体与墙背脱离,因此在计算侧向力时需确定土压力计算高度。根据朗肯土压力理论可得

$$z_0 = \frac{2c}{\gamma \sqrt{K_a}} \quad (3)$$

式中, K_a 为主动土压力系数。

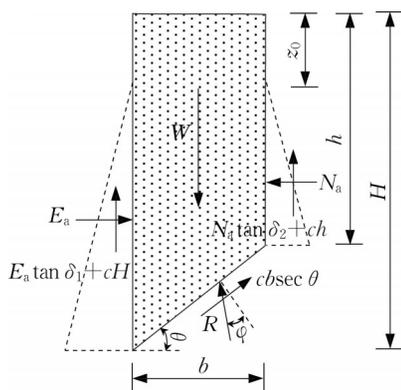


图3 主动状态受力分析

Fig.3 Stress analysis under active state

此时,比例系数 η_a 和土楔体重力 W 计算式分别为

$$\eta_a = \frac{N_a}{E_a} = \left(\frac{h - z_0}{H - z_0}\right)^2 = \left(\frac{H - b \tan \theta - z_0}{H - z_0}\right)^2 \quad (4)$$

$$W = \gamma b \left(H - \frac{1}{2} b \tan \theta\right) \quad (5)$$

受力平衡方程为:

$$\begin{cases} E_a + bc = \eta E_a + R \sin(\theta - \varphi) \\ E_a \tan \delta_1 + \eta E_a \tan \delta_2 + c(H - z_0) + \\ c(H - b \tan \theta - z_0) + R \cos(\theta - \varphi) + \\ bc \tan \theta = W \end{cases} \quad (6)$$

联立式(3)~(6),解得

$$E_a = \frac{bc \cot(\theta - \varphi) + 2cH - 2cz_0 - bH\gamma + \frac{1}{2}b^2\gamma \tan \theta}{(\eta - 1) \cot(\theta - \varphi) - \tan \delta_1 - \eta \tan \delta_2} \quad (7)$$

式(7)可适用于挡土墙墙背竖直粗糙且墙后填土水平的有限宽度土体。依据土压力合力极值条件,令 $\frac{\partial E_a}{\partial \theta} = 0$,即可求得土体滑裂面夹角 θ 。将 θ 代入式(7),即可求出挡土墙主动土压力合力 E_a 。

2.2 被动状态

被动状态与主动状态类似,土体受力如图 4 所示。其中, p_c 为土体黏聚力产生的土压力,其值受土体宽度影响较小,可仍按上海市规范进行计算。此时,比例系数为

$$\eta_p = \frac{N_p}{E_p} = \left(\frac{h - z_0}{H - z_0}\right)^2 = \left(\frac{H - b \tan \theta}{H}\right)^2 \quad (8)$$

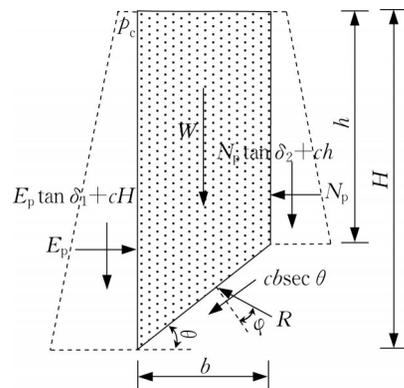


图4 被动状态受力分析

Fig.4 Stress analysis under passive state

同理,受力平衡方程为:

$$\begin{cases} E_p - bc = \eta E_p + R \sin(\theta + \varphi) \\ E_p \tan \delta_1 + \eta E_p \tan \delta_2 + cH + c(H - b \tan \theta) + \\ bc \tan \theta + W = R \cos(\theta + \varphi) \end{cases} \quad (9)$$

联立式(5)、(8)、(9),解得

$$E_p = \frac{bc \cot(\theta + \varphi) + 2Hc + bH\gamma - \frac{1}{2}b^2\gamma \tan \theta}{(1 - \eta) \cot(\theta + \varphi) - \tan \delta_1 - \eta \tan \delta_2} \quad (10)$$

式(1)求得的 θ 通常没有解析解,可利用Matlab等数值计算软件编制相应程序,通过循环迭代与极限逼近等手段得到对应的数值解。

事实上,当墙体后侧为无限宽度土体、墙土摩擦角为零时,上述推导结果可退化为朗肯表达式。同理,在无限宽度前提下,忽略土体黏聚力,上述推导过程与库伦土压力计算一致。

2.3 方法验证

为了检验计算结果的准确性,将有限元模拟结果与本文方法计算结果进行比对验证。以上海市黄浦区外滩区域的某项工程^[22]为背景,如图5所示。实际地质条件为:基坑挖深20.4 m,有限宽度土体与基坑宽高比 $b/H=0.4$, $\varphi=17.5^\circ$, $c=6.2$ kPa, $\gamma=17.9$ kN·m⁻³,墙土摩擦角 $\delta_1=\delta_2=\varphi/2$ 。选用Abaqus有限元软件进行建模分析,采用摩尔-库伦本构模型,设置挡墙为刚体,位移模式为平动,接触面法向为“硬”接触,切向设置对应罚函数,将本文方法计算结果与有限元模拟结果进行比对,如图6所示。

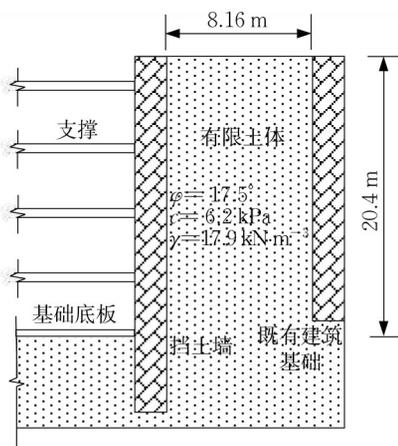


图5 上海市某工程实际工况示意图

Fig.5 Schematic diagram of actual condition of a project in Shanghai

将方焘等^[13]通过模型试验得到的宽高比 $b/H=0.27$ 的有限宽度土体土压力实测值与本文方法得到的计算值进行对比,结果如图7所示。

从图6、7可以得到,本文方法不仅与有限元模拟结果较为接近,还与模型试验值吻合良好,可以较好地反映墙体实际受力。

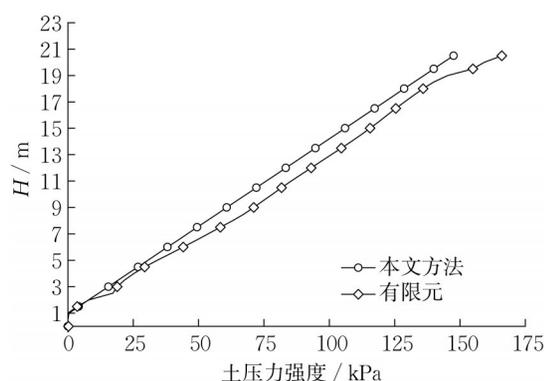


图6 本文方法与有限元方法计算结果对比

Fig.6 Comparison of calculation results between the proposed method and the finite element method

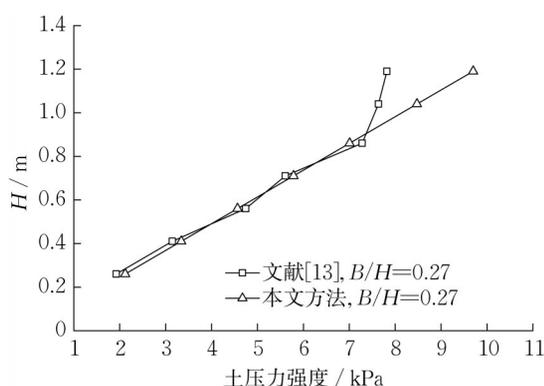


图7 本文方法计算值与文献[13]中试验结果对比

Fig.7 Comparison between calculation results of the proposed method and test results in Ref. [13]

3 有限土压力影响因素分析

墙后有限宽度土体土压力与土体宽高比、墙土摩擦角、土体黏聚力及土体内摩擦角等因素有关。实际情况中,既有建筑基础与基坑挡土墙材料均为混凝土材质,有限宽度土压力主要受土楔体前侧墙土摩擦角控制,故假设 $\delta=\delta_1=\delta_2$, $H=10$ m, $\delta=\varphi/3$, $c=10$ kPa, $\varphi=30^\circ$, $\gamma=20$ kN·m⁻³为基本工况,探究各因素对有限宽度土压力的影响规律。

3.1 墙土摩擦角

探讨不同宽高比下墙土摩擦角 $\delta=\varphi/3$, $\varphi/2$, $2\varphi/3$ 时土压力合力 E 的分布规律。由图8a可知,对于主动状态,随着土体宽高比的逐渐增大,土压力合力也相应增加,最终趋于稳定。增大墙土摩擦角,会略微降低墙后主动土压力合力;墙后摩擦力的存在使得土体不论处于何种状态,其土压力合力都比朗肯法

计算值小,表明在计算受力时不应忽略墙土摩擦力。

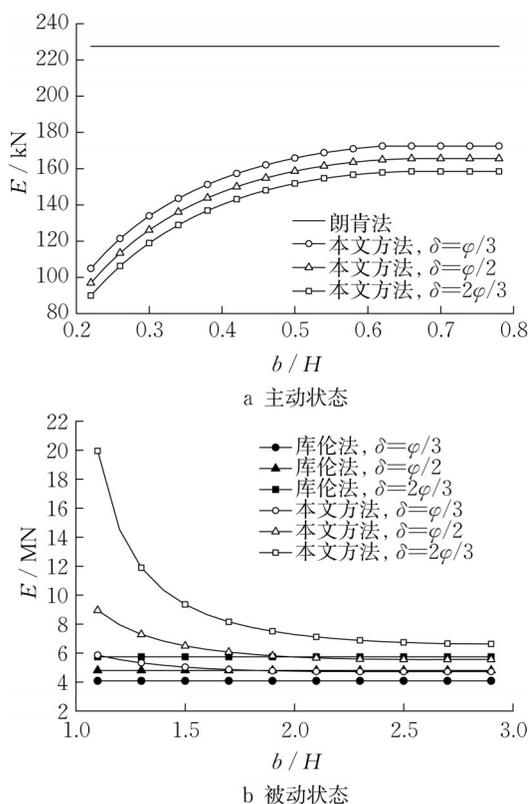


图 8 不同状态下墙土摩擦角对土压力合力的影响

Fig.8 Effect of wall-soil friction angle on earth pressure under different states

被动状态下,土压力合力与土体宽高比关系如图 8b 所示。随着土楔体宽高比的减小,墙后土压力从库伦土压力值附近缓慢增加,但当宽高比减小到一定值时,土压力呈指数形式增加,这与应宏伟等^[16]得到的结论一致。当土体宽高比减小到临界宽高比 ζ 时,墙后土体出现多道滑裂面,此时土压力合力显著增加,墙土摩擦角对 ζ 的影响较大。土压力合力随着墙土摩擦角的增大而增大,对应的 ζ 也增加: $\delta=\varphi/3, \zeta=0.9$; $\delta=\varphi/2, \zeta=1.1$; $\delta=2\varphi/3, \zeta=1.0$ 。临界宽高比附近的土压力合力变化剧烈,极易发生安全事故,对周边建筑造成损害。这种情况在实际中并不会出现,因此在后续计算和分析中不考虑该情况。除此情形以外,与主动状态相反,被动状态下墙土摩擦力会阻碍墙体运动,因此随着墙土摩擦角的增加墙体受到的被动土压力合力也会相应增大,但增幅较缓,即:在有限土体宽高比较大时,有限土体宽高比与墙土摩擦角对被动土压力影响较小。

3.2 土体内摩擦角

土体内摩擦角 φ 分别为 20° 、 30° 、 40° 时,在有限宽度 b 共同作用下,探究挡土墙后土压力合力 E 的变化

规律,如图 9 所示。变土体内摩擦角下墙后土压力合力的变化规律与变墙土摩擦角下类似。随着土体宽高比的增大,主动状态下墙后土压力合力趋向于朗肯计算值,被动状态下趋近于库伦计算值。对于主动状态,土体内摩擦角增大会增加土体内部的摩擦力,致使墙体受到的土压力合力降低,同时削弱土体宽高比的影响,即主动状态下,有限宽度土体土压力浮动范围将会随着土体内摩擦角的增大而减小;对于被动状态,土体内摩擦角的增加对墙后土压力的变化有一定的积极作用,同时会显著提高土体临界宽高比。

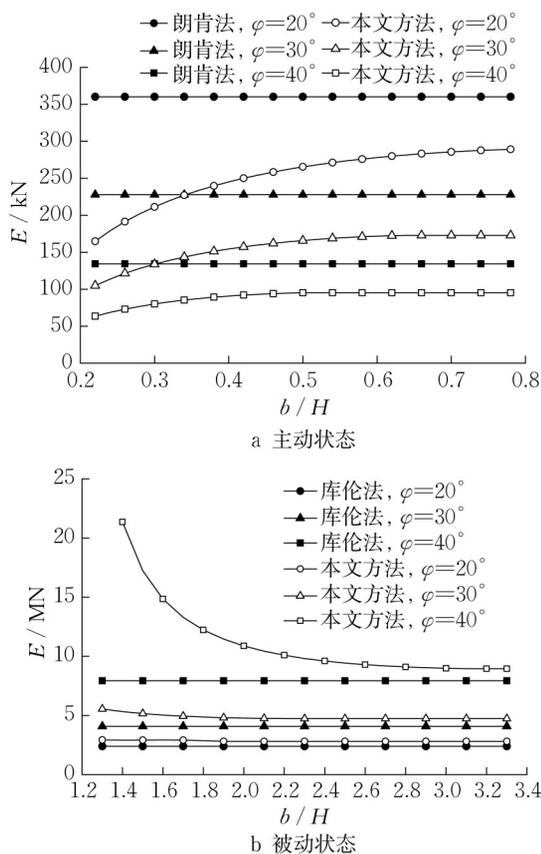


图 9 不同状态下土体内摩擦角对土压力合力的影响

Fig.9 Effect of internal friction angle of soil on earth pressure under different states

3.3 土体黏聚力

当土体黏聚力分别为 10、15 kPa 时,探讨不同宽高比挡土墙后土压力合力 E 的变化。

由图 10 可知,随着土体宽高比的减小,主动状态下土压力合力逐渐减小,而被动状态下土压力合力逐渐增大。土体黏聚力的增加使得土体内摩擦力与墙土摩擦力变大,主动状态下土压力合力逐渐减小,被动状态下逐渐增大。进一步分析发现,不论是主动状态还是被动状态,不同黏聚力下得到的墙后土压力合力曲线几

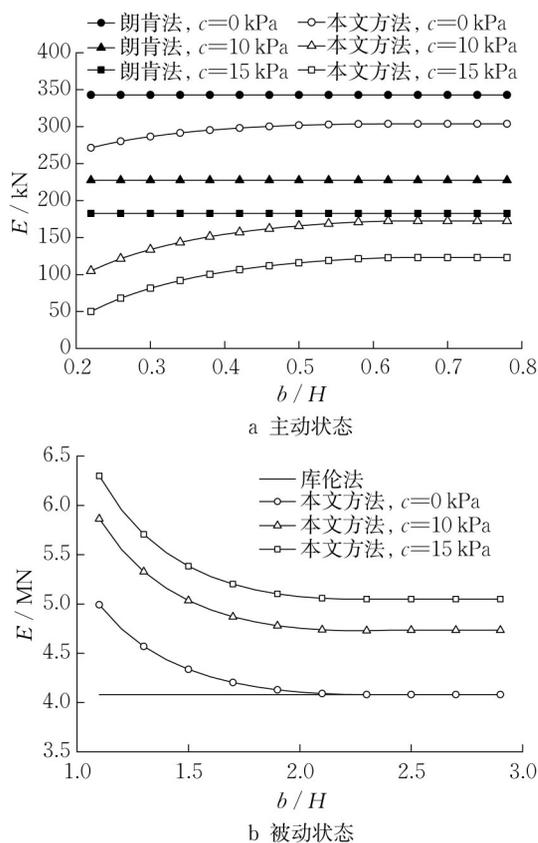


图10 不同状态下土体黏聚力对土压力合力的影响规律
Fig.10 Effect of soil cohesion on earth pressure under different states

乎平行;对于被动状态,黏聚力的改变对土体宽高比的极限值与临界值影响较小。上述规律表明,土体黏聚力对土压力的影响几乎恒定。

4 滑裂面夹角变化规律分析

4.1 滑裂面夹角浮动范围

在整个计算系统中,最为核心且复杂的环节就是滑裂面夹角 θ 的确定。在主动状态下,根据摩尔-库伦准则,极限状态土体破坏面与大主应力所在平面的夹角为 $(45^\circ + \varphi/2)$ 。当土体中大主应力方向不发生偏转时,即大主应力为竖直方向,滑裂面夹角就是 $(45^\circ + \varphi/2)$,这需要满足墙体光滑这一前置条件。当墙体不光滑时,大主应力方向发生偏转,左侧挡土构件附近土体大主应力顺时针偏转,相应的滑裂面夹角所能达到的上限为: $\theta_{ia} = 45^\circ + \varphi/2$ 。考虑土体有限宽度的影响,库伦土压力在半无限空间假设下得到的滑裂面夹角 θ_{ca} 应为滑裂面夹角的下限。滑裂面夹角计算范围应大致在 $\theta_{ia} \sim \theta_{ca}$ 之间,实际上改变土体宽高比 b/H 及有关参数均会得到此结论。被动状态下,滑裂面夹角应在 $\theta_{ip} = 45^\circ - \varphi/2$ 与按照库伦

法计算的 θ_{cp} 之间浮动。

当墙背竖直、墙后填土水平时,对应的库伦主动滑裂面夹角 $\theta_{ca}^{[20]}$ 与被动滑裂面夹角 $\theta_{cp}^{[23]}$ 分别为

$$\tan \theta_{ca} = \tan \varphi + \sqrt{\tan^2 \varphi + \frac{\tan \varphi}{\tan(\varphi + \delta)}} \quad (11)$$

$$\tan \theta_{cp} = \frac{1 - \tan \varphi \tan \delta}{(\tan \varphi + \tan \delta) \left(1 + \sqrt{\frac{\tan^2 \varphi + 1}{\tan^2 \varphi + \tan \varphi \tan \delta}} \right)} \quad (12)$$

4.2 墙土摩擦角和土体内摩擦角的影响

除了土体宽度影响外,滑裂面夹角主要与墙土摩擦力、土体内摩擦角有关。为了探明滑裂面夹角变化规律,取基本工况为: $\delta = \delta_1 = \delta_2 = \varphi/3$, $H = 10$ m, $c = 10$ kPa, $\varphi = 30^\circ$, $\gamma = 20$ kN \cdot m $^{-3}$ 。

4.2.1 墙土摩擦角

当 $\delta = \varphi/3, \varphi/2, 2\varphi/3$ 时,滑裂面夹角 θ 随宽高比的变化如图11所示。对于主动状态, $\theta_{ia} = 60^\circ$, $\theta_{ca} = 57.80^\circ, 56.86^\circ, 55.98^\circ$ 。对于被动状态: $\theta_{ip} = 30^\circ, \theta_{cp} = 23.4^\circ, 20.7^\circ, 18.1^\circ$ 。

由图11a可知,在有限宽度土体前提下,滑裂面夹角 θ_a 均大于库伦法计算夹角 θ_{ca} 。随着土体宽度减小, θ_a 逐渐增大,且增幅逐渐放缓,最终均趋向于 θ_{ia} 。虽然当宽高比($b/H < 0.3$)过小时 θ 会大于 θ_{ia} ,但增幅较小。 δ 值的增加会增加土体临界宽高比,同时也会增加破坏角度的变化区间。对于处在同一宽高比的土体, δ 值越大,土体宽度对滑裂面夹角 θ_a 的影响越大,破坏角度也更小。

由图11b可知,当土体宽度小于临界值时,滑裂面夹角 θ_p 均大于库伦滑裂面夹角 θ_{cp} 。随着土体宽高比的减小, θ_a 逐渐增加,且趋于稳定,上述规律与郑贝贝^[24]得到的结论一致。然而,墙土摩擦角的增加使得土体临界宽高比显著增加,从原先的2.4增大至3.1,这说明在被动状态下确定有限宽度土体计算范围时需要着重注意墙土摩擦角。

4.2.2 土体内摩擦角

为了研究土体内摩擦角的影响,计算 φ 为 $20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ 时对应的土体滑裂面夹角 θ_{ia} 与 θ_{ca} ,如表1所示。

由图12、13可知,在不同状态下,虽然各工况土体滑裂面夹角相差较大,但是变化区间始终在朗肯计算值与库伦计算值附近。随着土体宽高比的减小,主动状态逐渐靠近朗肯计算值;在接近临界宽度之前,被动状态也与主动状态类似。此外,不论何种状态土体内摩擦角的变化对于土体宽高比极限值

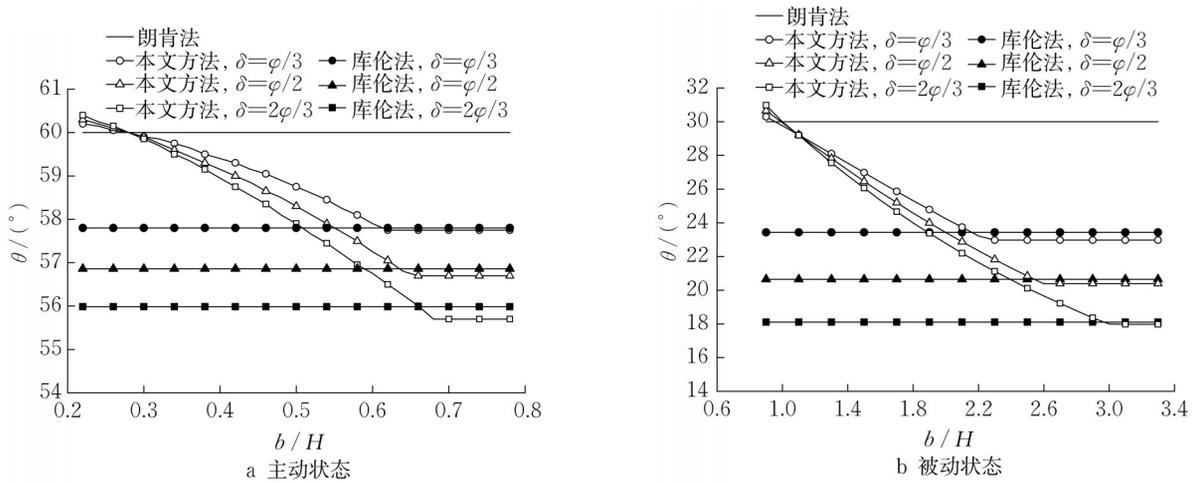


图 11 不同状态下墙土摩擦角对滑裂面夹角的影响

Fig.11 Effect of wall-soil friction angle on sliding surface angle under different states

表 1 不同土体内摩擦角对应的滑裂面夹角

Tab.1 Corresponding sliding surface angles for different internal friction angles of soil

单位: (°)

方法	θ_{ia}			θ_{ca}		
	$\varphi=20^\circ$	$\varphi=30^\circ$	$\varphi=40^\circ$	$\varphi=20^\circ$	$\varphi=30^\circ$	$\varphi=40^\circ$
朗肯法	55.0	60.0	65.0	35.0	30.00	25.0
库伦法	52.2	57.8	63.3	29.3	23.42	17.4

与临界值都有着直接的影响。

5 工程应用简化

鉴于式(1)中 θ 没有对应解析解,通过数值方法进行求解过于繁琐,为了便于工程应用,需要对计算结果进行分析与简化。 δ 、 η 等因素影响下土体滑裂

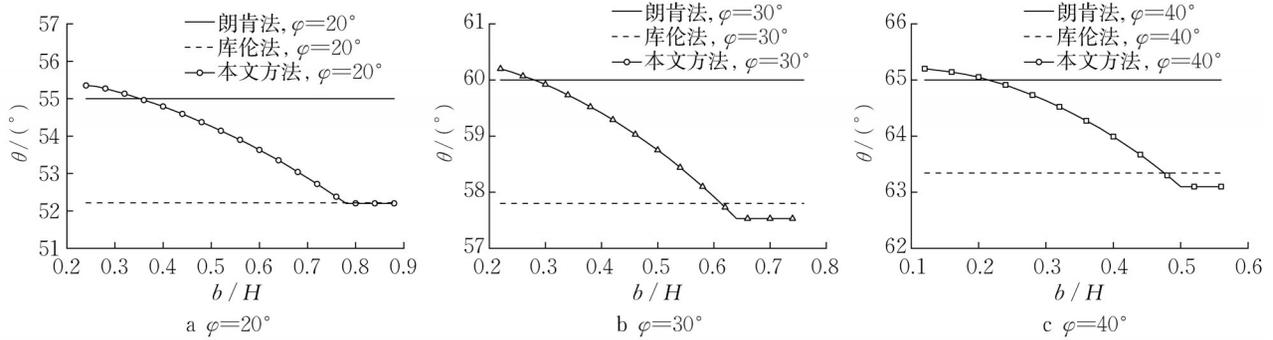


图 12 主动状态下土体内摩擦角对滑裂面夹角的影响

Fig.12 Effect of internal friction angle of soil on sliding surface angle under active state

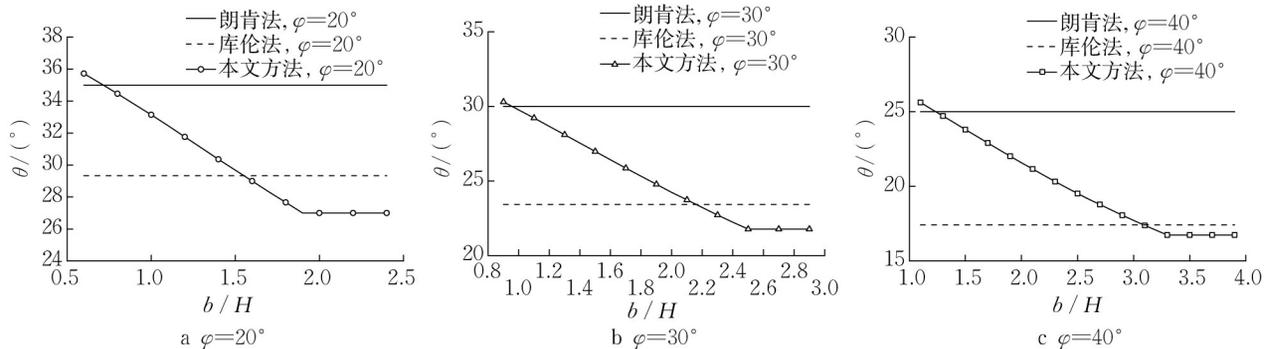


图 13 被动状态下土内摩擦对滑裂面夹角的影响

Fig.13 Effect of internal friction angle of soil on sliding surface angle under passive state

面夹角计算式为

$$\theta = \theta_1 - \frac{\delta}{4} \quad (13)$$

式中,主动状态下 $\theta_1 = 45^\circ + \varphi/2$,被动状态下 $\theta_1 = 45^\circ - \varphi/2$ 。当土体墙后两侧墙土摩擦角不同时,可取平均值^[3]。对于被动状态,计算中可能出现 $H - b \tan \theta \leq 0$ 的情况,即 N 与 E 同向,这与事实不符。为了忽略 N 的作用,应取 $\eta = 0$ 。以 $H = 10 \text{ m}$, $\delta_1 = \delta_2 = \varphi/3$, $\gamma = 20 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$, $\varphi = 30^\circ$, $c = 10 \text{ kPa}$ 为例,不同条件下有限宽度土体的主动状态和被动状态土压力合力曲线拟合结果如 14、15 所示。

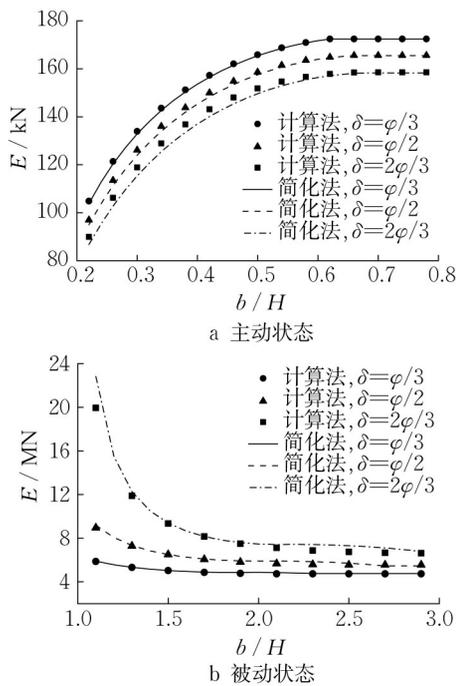


图 14 不同状态变墙土摩擦角下土压力合力拟合曲线
Fig.14 Fitting curves of variable wall-soil friction angles under different states

通过比较各工况可知,采用上述方法对实际计算角度进行等效替代,不仅对于主动或是被动状态计算精度均有一定的保证,还可以极大地提高计算效率。考虑到实际工程可能涉及多种土层,可以将土层参数按厚度加权平均后进行等效替换,这在保证计算准确性的同时大幅简化工作量。

分别采用本文方法、上海市规范法、库伦法、上限解法对文献[22]中的上海某项目进行计算分析,结果如表 2 所示。由于朗肯与库伦土压力理论均未考虑有限宽度的影响,因此计算结果偏大。高印立^[1]提出的上限解法虽然考虑了土体有限宽度的影响,但未考虑墙土摩擦力,因此计算结果较本文方法偏大。上海市规范法土压力合力计算值为 1 833.1

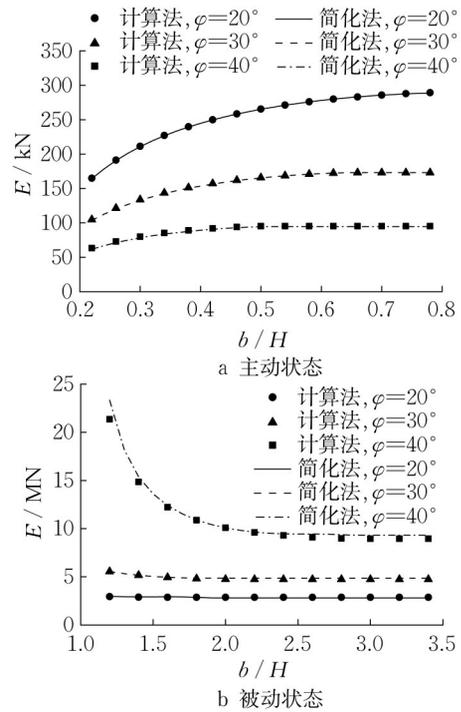


图 15 不同状态变土体内摩擦角下土压力合力拟合曲线
Fig.15 Fitting curves of variable internal friction angles of soil under different states

kN, 本文简化方法土压力合力计算值为 1 438.7 kN, 两者差值约为 21.5%。

表 2 各方法计算结果

Tab.2 Comparative analysis table of various methods

分析方法	土压力合力/kN	与简化法差值百分比/%
本文方法	1 438.7	
上海市规范法	1 833.1	21.5
库伦法	1 845.8	22.1
上限解法	1 555.8	7.5

6 结论

(1) 得到不同工况下有限宽度土压力的计算公式,土体内摩擦角对土压力影响较为显著,墙土摩擦角与黏聚力则影响较小。

(2) 分析了不同工况下有限宽度土压力合力的变化规律,探讨了滑裂面夹角的浮动范围,该值与墙土摩擦角和土体内摩擦角关联较为密切。

(3) 提出了有限宽度土体土压力的简化计算方法,易于工程设计人员的实际应用。

作者贡献声明:

梁发云:论文构思,论文写作与修改。

华建:公式推导,数据分析,论文写作与修改。

李 林:公式推导,论文修改与校审。

李明广:论文修改与校审。

徐中华:提供研究资料,论文修改与校审。

参考文献:

- [1] JANSSEN H A. Versuche uber getreidedruck in silozellen [J]. Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure, 1895, 39: 1045.
- [2] FRYDMAN S, KEISSAR I. Earth pressure on retaining walls near rock faces [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1987, 113(6): 586.
- [3] TAKE W A, VALSANGKAR A J. Earth pressures on unyielding retaining walls of narrow backfill width [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2001, 38(6): 1220.
- [4] KNISS K T, YANG K-H, WRIGHT S G, *et al.* Earth pressures and design considerations of narrow MSE walls [C]// Proceeding of the Conference of Texas Section. Washington DC: ASCE, 2007:596-619.
- [5] YANG K H, KNISS K K, ZORNBERG J G, *et al.* Finite element analyses for centrifuge modeling of narrow MSE walls [C]//Proceedings of First Pan American Geosynthetics Conference. Cancun:[s.n.], 2008: 1246-1255.
- [6] HU H, YANG F, TANG H, *et al.* Field study on earth pressure of finite soil considering soil displacement [J]. Applied Sciences, 2022, 12(16): 8059.
- [7] FAN C, FANG Y. Numerical solution of active earth pressures on rigid retaining walls built near rock faces [J]. Computers and Geotechnics, 2010, 37: 1023.
- [8] GRECO V R. Analytical solution of seismic pseudo-static active thrust acting on fascia retaining walls [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2014, 57: 25.
- [9] GRECO V. Active thrust on retaining walls of narrow backfill width [J]. Computers and Geotechnics, 2013, 50: 66.
- [10] LIAO W, ZHANG J, WU J, *et al.* Active earth pressure of finite width soil considering intermediate principal stress and soil arching effects [J]. International Journal of Geomechanics, 2022, 147(1): 04021294.
- [11] 高印立. 有限土体土压力的计算探讨[J]. 建筑科学, 2000(5): 53.
GAO Yinli. Discussion on the calculation of earth pressure of limited soil mass [J]. Building Science, 2000(5): 53.
- [12] 中国建筑科学研究院. 北京市建筑基坑支护技术规程:DB11/489—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
China Academy of Building Research. Technical specification for support of foundation pits in Beijing: DB11/489—2016 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.
- [13] 方焘, 杨思敏, 徐长节, 等. 浸水条件下有限土体土压力试验与数值分析研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(6): 1699.
FANG Tao, YANG Simin, XU Changjie, *et al.* Experimental and numerical analysis study on earth pressure of limited soil mass under submerged conditions [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(6): 1699.
- [14] 蔡叶澜. 平移模式下有限空间无黏性填土挡墙主动土压力模型试验研究[J]. 公路, 2020, 65(5): 65.
CAI Yelan. Experimental study on active earth pressure model of non-cohesive backfill retaining walls in limited space under translation mode [J]. Highway, 2020, 65(5): 65.
- [15] 马平, 秦四清, 钱海涛. 有限土体主动土压力计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2008(S1): 3070.
MA Ping, QIN Siqing, QIAN Haitao. Calculation of active earth pressure of limited soil mass [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008(S1): 3070.
- [16] 应宏伟, 郑贝贝, 谢新宇. 狭窄基坑平动模式刚性挡墙被动土压力分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(12): 3755.
YING Hongwei, ZHENG Beibei, XIE Xinyu. Analysis of passive earth pressure on rigid retaining walls in translational mode for narrow foundation pits [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(12): 3755.
- [17] 仲山贵司, 小島謙一. 土木部門 都市部鉄道構造物の近接施工対策マニュアル[J]. 日本鉄道施設協会誌, 2007, 45(5): 394.
- [18] YANG M, TANG X, WU Z. Slip surface and active earth pressure of cohesionless narrow backfill behind rigid retaining walls under translation movement mode [J]. International Journal of Geomechanics, 2020, 20(8): 04020115.
- [19] HANDY R L. The arch in soil arching [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(3): 302.
- [20] 蒋波. 挡土结构土拱效应及土压力理论研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
JIANG Bo. Study on soil arching effect and earth pressure theory of retaining structures [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.
- [21] PAIK K H, SALGADO R. Estimation of active earth pressure against rigid retaining walls considering arching effects [J]. Géotechnique, 2003, 53(7): 643.
- [22] 戴斌, 胡耘, 王惠生. 上海地区相邻基坑同步开挖影响分析与实践[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(S2): 129.
DAI Bin, HU Yun, WANG Huisheng. Analysis and practice of the impact of simultaneous excavation of adjacent foundation pits in Shanghai area [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(S2): 129.
- [23] 张文戈. 挡土墙的库仑土压力[J]. 力学与实践, 1997, 19(5): 73.
ZHANG Wenge. Coulomb earth pressure of retaining walls [J]. Mechanics in Engineering, 1997, 19(5): 73.
- [24] 郑贝贝. 考虑挡墙位移及有限土体影响的土压力研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
ZHENG Beibei. Research on earth pressure considering the displacement of retaining walls and the influence of limited soil mass [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.