

深基坑双层土体空间效应分析

金璐¹,董峻豪¹,王婵²

(1. 山东省城乡建设勘察院, 山东 济南 250014; 2. 山东省物化探勘察院, 山东 济南 250014)

摘要:随着城市的不断发展, 基坑开始由传统的二维模式向三维空间转变。该文借助于坑壁土体的三维破坏模式, 推导出双层土体的破坏模型, 在此模型基础上基于土体塑性上理论及极限平衡分析理论, 提出了考虑空间效应的土压力计算公式以及相应的空间效应影响系数。该计算公式可用于基坑土钉墙、护坡桩、地下连续墙等支护系统的设计。

关键词:深基坑; 空间效应; 极限平衡分析; 空间土压力

中图分类号: TU473.1

文献标识码: B

与以往较浅的基坑不同, 深基坑具有明显的三维空间特点, 在基坑两侧存在明显的空间效应, 结合塑性势理论和相关联流动法则建立了基坑双层土体下空间效应的破坏模型, 该文在此模型的基础上对空间效应进行研究。

1 双层土体空间效应模型

1.1 模型假设

①假定挡土结构后上部土体内滑动破裂面为一平面; ②挡土结构后土体为无粘性土, 土体内摩擦角为 φ , 重度为 γ ; ③边坡横截平面内滑动破裂面为直线型, 滑裂面与竖直线夹角为 θ ; ④挡土结构面与土体间的摩擦角为 δ ; 挡土结构符合自由变形假定; ⑤基坑长为 B , 坑深为 H , 基坑塑性区影响长度为 B' 。

1.2 滑楔体几何模型的建立

深基坑中的空间效应, 受基坑的坑臂长 B 与坑深 H 的比值, 即 B/H 的影响较大, 当 $B/H \geq 5$ 时, 深基坑中的空间效应的影响程度较小, 可以不必考虑, 当 $B/H < 5$ 时, 深基坑中的空间效应比较明显, 由于深基坑坑壁土体受到两侧坑壁端部的约束作用, 深基坑坑壁处的土体将会呈三维失稳破坏状态。

关于挡土墙后滑裂体的模型国内外学者也做过许多研究, 索柯洛夫通过试验假设土体中滑动面为

平面, 滑裂体为棱柱形截柱体, 滑裂体顶面的形状为等腰梯形, 两侧边与下底边角度为 45° 。该文在索科洛夫假设的模型的基础上, 结合塑性势理论和相关联流动法则, 对此模型进行优化^[1]。

如图1所示, 挡土墙的墙高为 H , 墙面竖直光滑, 墙后为均质分层无粘性土^[2], 上层土体的容重、粘聚力、内摩擦角、填土高度分别为 $\gamma_1, c_1, \varphi_1, H_1$; 下层土体的容重、内摩擦角、填土高度分别为 $\gamma_2, c_2, \varphi_2, H_2$; 填土与墙面的内摩擦角为 δ 。

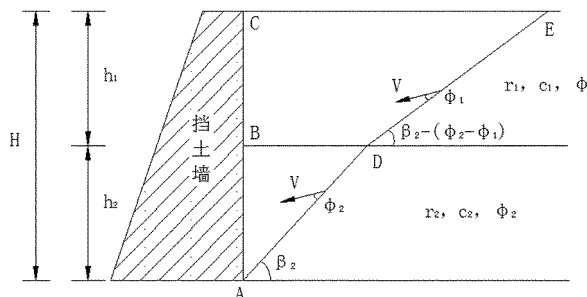


图1 双层土体侧面计算简图

在基坑坑壁土体破坏状态下, 假设墙后滑裂体滑裂面的应变速率为 v , 根据土体塑性势理论及相关联流动法则, 滑裂体的速度方向 v 与滑裂面之间的夹角应为相应土体的内摩擦角 φ , 由于墙后为分层填土, 因此滑裂面应为一折线, 滑裂面为 ADE , 假设下层土体破裂面与水平面夹角为 β , 即 AD 与水平

收稿日期: 2014-04-12; 修订日期: 2014-07-03; 编辑: 陶卫卫

作者简介: 金璐(1985—), 女, 山东济南人, 助理工程师, 主要从事岩土施工工作; E-mail: sdytsg@163.com。

面的夹角为 β , 则上层土体破裂面与水平面的夹角必为 $\beta - (\varphi_2 - \varphi_1)$, 即 DE 与水平面的夹角为 $\beta - (\varphi_2 - \varphi_1)$, 这样才符合土体的变形协调条件与相关联流法则, 滑裂体为 $ABCE$ 所包围的土体。

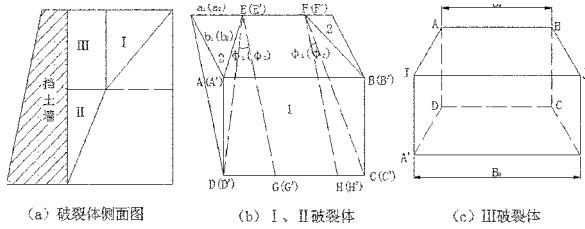


图2 双层填土滑裂体示意图

在双层土体模型中, 将整个滑裂体划分为3个区域, 上层滑裂土体划分为区域 I 和 III, 下层滑裂土体为区域 II, 如图 2(a) 所示, 区域 I 和 II 与周围土体的接触条件、所受外力、滑裂体形状相似, 因此可以归为同一种破裂类型^[3]。

挡土墙后填土体的屈服函数为 $f = \tau - c - \sigma_n \tan \varphi$, 区域 I 内滑裂体的内摩擦角为 φ_1 , 假定滑裂体的滑动速度为 v , 如图 1 所示, 滑动速度 v 与滑裂斜面 $EFCD$ 的滑动切线 ED (或 FC) 成 φ_1 角。两侧滑裂面 ADE 和 BCF 的滑动切线分别为 ED 和 FC , 因而两侧面土体的滑动速度也必与 ED 和 FC 均成 φ 角。由整个坑壁三维破裂土体滑动速度的相容、连续条件知, ED 与 EG 的夹角必为 φ_1 , FC 与 FH 的夹角也必为 φ_1 , 如图 2(b) 所示。同理, 区域 II 内滑裂体边界 $E'D'$ 与 $E'G'$ 的夹角为 φ_2 , $F'C'$ 与 $F'H'$ 的夹角也为 φ_2 , 如图 2(b) 所示。

2 双层土体空间效应影响系数的确定

空间效应影响系数^[4,5]是衡量空间效应影响程度大小的主要参数。目前, 对于这一参数的算法还不统一, 中国建筑科学研究院地基所的黄强教授, 定义空间效应影响系数 K 为空间效应影响区域内的土压力与非影响区内土压力的比值。其计算式为:

$$K = \frac{x}{h} \cdot \frac{1 - m \cdot \tan \varphi \cdot x}{m \cdot x + \tan \varphi} \quad (1)$$

式中: $m = \tan(45 - \frac{\varphi}{2})/h$; x 为坑长方向的计算长度; h 为基坑深度。

该文采用的空间效应影响系数 K 计算方法为杨雪强教授提出的方法, 即采用三维空间状态下计

算的土压力与平面二维状态下的土压力的比值。深基坑双层土体破坏形式如图 3 所示, 双层土体的滑楔体三维出露边界比较复杂, 如果严格按照模型的出露边界会给计算带来很大的困难, 因此该文采用加权破裂角和加权土体的内摩擦角的方式, 来简化滑楔体的三维出露边界和计算公式, 简化后的深基坑顶面滑楔体的出露边界如图 3 所示。从图 3 可知, 深基坑空间效应主要影响区域为距离两侧坑角为 b 的宽度范围内, 中间宽度范围 $(B - 2b)$ 是空间效应的次要影响区域。

根据各专家学者的研究, 深基坑中空间效应影响程度与基坑的坑壁长 B 和坑深 H 的比值有关, 当 $\frac{B}{H} \leq 5$ 时, 深基坑的空间效应比较显著, 尤其是在深基坑的角部范围内, 可以适当减少坑角区域的基坑支护降低工程造价, 随着基坑壁长 B 与坑深 H 的比值 B/H 逐渐增大, 空间效应的影响逐渐减少, 当 $\frac{B}{H} \geq 5$ 时, $(B - 2b)$ 段受空间效应的影响很小, 可不必按照下列公式计算, 直接按照朗肯或者库伦土压力理论计算该段挡土结构上作用的土压力即可。

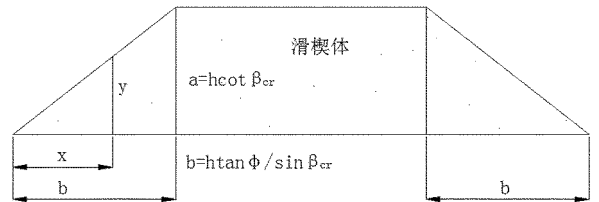


图3 基坑边坡滑楔体边界线

可算出下层土体的三维临界破裂角 β_2 , 根据下层土体的破裂角 β_2 可推算出上层土体的临界破裂角 β_1 , 为简化计算模型, 对整个滑楔体的临界破裂角 β_{cr} 进行加权计算并对整个滑楔体的内摩擦角也进行相应的加权处理, 即滑楔体的内摩擦角为 φ :

$$\varphi = \frac{\varphi_1 h_1 + \varphi_2 h_2}{h_1 + h_2} \quad (2)$$

在简化模型的基础上, 根据力的极限平衡理论, 计算基坑两侧端部范围 b 以及基坑中间 $(B - 2b)$ 区域范围内支护结构上的主动土压力。

$(B - 2b)$ 区域范围内的主动土压力: 在基坑坑壁中间 $(B - 2b)$ 区域内, 如图 4 所示, 为简化后的滑楔体在单位长度上所受的力组成的闭合三角形与相应的主动土压力分布图。利用正弦定理整理得:

$$P_a = \frac{1}{2} \gamma h^2 \frac{\cot \beta_{cr} \sin(\beta_{cr} - \varphi)}{\cos(\beta_{cr} - \delta - \varphi)} \quad (3)$$

式中： $h = h_1 + h_2$ ； P_a 的作用点离基坑底部距离为 $h/3$ 。

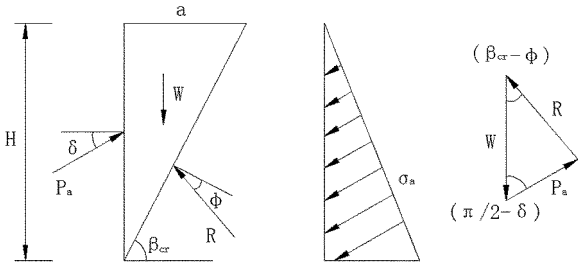


图4 (B-2b)坑壁段的土压力及其闭合的力三角形

b 区域范围内的主动土压力：在基坑坑壁两端长度为 b 的区域内，如图5所示，简化后的滑楔体在单位长度上所受的力组成的闭合三角形与相应的主动土压力分布图。同理可得出相应的作用在支护结构上的主动土压力为：

$$P_{ax} = \frac{1}{2} \gamma h^2 \frac{\cot \alpha \sin(\alpha - \varphi)}{\cos(\alpha - \delta - \varphi)} \quad (4)$$

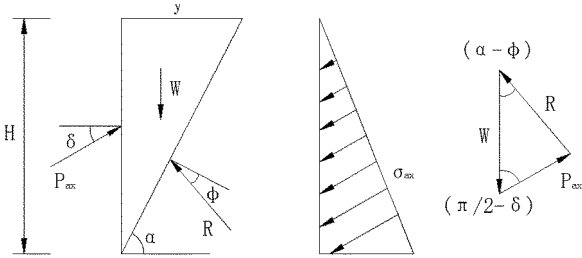


图5 b坑壁段的土压力及其闭合的力三角形

如图3所示，取任意长度 x ，相应的有：

$$\frac{y}{a} = \frac{x}{b} \quad (5)$$

将 $a = h \cot \beta_{cr}$ 和 $b = h \frac{\tan \varphi}{\sin \beta_{cr}}$ 带入(5)，式中 β_{cr} 和 φ 均为加权后得出的值，再带入(4)后，整理得：

$$P_{ax} = \frac{1}{2} \gamma h x \frac{\cos \beta_{cr} \cos \varphi (1 - \frac{x}{h} \cos \beta_{cr})}{\sin(\delta + \varphi) \tan \varphi + \frac{x}{h} \cos(\delta + \varphi) \cos \beta_{cr}} \quad (6)$$

如图5所示， P_{ax} 的作用点距离基坑底部距离为 $h/3$ 。

在平面二维状态下，当支挡结构后土体为无粘性土时，单位长度支护结构上的主动土压力 $P_{a\text{平}}^{\pm}$ 为：

$$P_{a\text{平}}^{\pm} = \frac{1}{2} \gamma h^2 \frac{\cot \theta_{cr} \sin(\theta_{cr} - \varphi)}{\cos(\theta_{cr} - \delta - \varphi)} \quad (7)$$

式中：二维状态下的临界破裂角 θ_{cr} 可以通过试算求出，将不同的 θ 值代入式中，当得的主动土压力为最大值时，此时的 θ 角为临界破裂角 θ_{cr} 。空间效应影响系数 K 为：

$$K = \left[\frac{\cot \beta_{cr} \sin(\beta_{cr} - \varphi)}{\cos(\beta_{cr} - \delta - \varphi)} \right] / \left[\frac{\cot \theta_{cr} \sin(\theta_{cr} - \varphi)}{\cos(\theta_{cr} - \delta - \varphi)} \right] \quad (8)$$

$$\left(h \frac{\tan \varphi}{\sin \beta_{cr}} \leq x \leq \frac{B}{2} \right)$$

3 算例研究

已知一深基坑工程位于苏州市相城区阳澄湖路以南，人民路以西，是一栋地上21层，地下2层的高层建筑。基坑开挖深度 $h = 6.0 \text{ m}$ ，基坑长边尺寸为26 m，短边尺寸为18 m，深基坑采用地下连续墙支护，墙背竖直，墙后土体为无粘性土，土体表面水平，地面无荷载，如图6(a)所示，墙后土体均匀分为两层，上层土体容重 $\gamma_1 = 17 \text{ kN/m}^3$ ，内摩擦角 $\varphi_1 = 18^\circ$ ，下层土体容重 $\gamma_2 = 19 \text{ kN/m}^3$ ，内摩擦角 $\varphi_2 = 26^\circ$ ，基坑壁的支护结构与土体间的内摩擦角 $\delta = 15^\circ$ 。

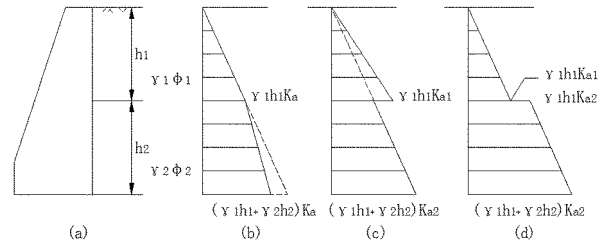


图6 双层土体计算简图

3.1 基坑长边界的主动土压力及空间效应影响系数

由于基坑坑壁对称，可以取坑壁长的一半来进行研究。将例题中各参数带入得出下层土体破裂角 $\beta_2 = 56^\circ$ ，则 $\beta_1 = 48^\circ$ ，将 β_1 和 β_2 带入可得墙后土体的破裂角 $\beta_{cr} = 52^\circ$ ，将 φ_1 和 φ_2 带入可得墙后土体的内摩擦角 $\varphi = 22^\circ$ 。

将 β_1 和 β_2 带入可得作用在长边上的总主动土压力 $E_a^{\text{总}} = 2752.98 \text{ kN}$ ，在二维平面状态下，作用在长边上的总主动土压力 $E_a^{\text{总}'} = E_a \cdot B = 3471.182 \text{ kN}$ 。通过结果可知在三维状态下得出的总主动土压力小于二维平面状态下的总主动土压力，在实际工程中按二维状态计算过于保守。

由 $\beta_{cr} = 52^\circ, \varphi = 22^\circ$ 可知,空间效应影响区长度 $b = h \frac{\tan\varphi}{\sin\beta_{cr}} = 3.08 \text{ m}$ 。则在 $0 \leq x \leq 3.08 \text{ m}$ 的区域内为空间效应的主要影响区域,取不同的 x 值进行计算,将得出的空间效应系数 K 值,将 K 值整理得出空间效应影响曲线,如图7所示。

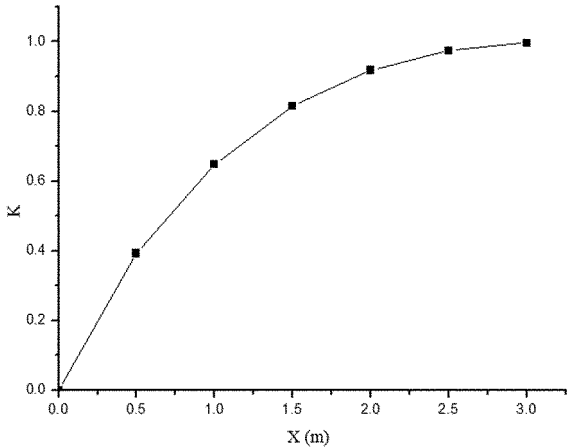


图7 区域内空间效应影响曲线

在 $3.08 \text{ m} \leq x \leq 13 \text{ m}$ 区域内,为空间效应次要影响区域,将 $\beta_{cr} = 52^\circ, \varphi = 22^\circ$ 带入式(3)可得到相应的主动土压力 $P_a = 131.033 \text{ kN/m}$,相应的空间效应系数 $K = 0.9995$ 。

3.2 基坑短边界的主动土压力及空间效应影响系数

同理,取基坑坑壁一半进行研究。将 $\gamma_1 = 17 \text{ kN/m}^3, \gamma_2 = 19 \text{ kN/m}^3, \varphi = 18^\circ, \varphi = 26^\circ$ 带入得出下层土体破裂角 $\beta_2 = 58^\circ$,则 $\beta_1 = 50^\circ$ 。将 β_1 和 β_2 带入可得墙后土体的破裂角 $\beta_{cr} = 54^\circ$,将 φ_1 和 φ_2 带入式(2)可得墙后土体的内摩擦角 $\varphi = 22^\circ$ 。

将 β_1 和 β_2 带入可得作用在短边上的总主动土压力 $E_a^{\text{总}} = 1850.560 \text{ kN}$,在二维平面状态下,作用在短边上的总主动土压力 $E_a^{\text{总}} = E_a \cdot B = 2358.594 \text{ kN}$ 。结果与基坑长边界相同,采用二维平面计算方法明显过于保守。

由 $\beta_{cr} = 52^\circ, \varphi = 22^\circ$ 可知,空间效应影响区长度 $b = h \frac{\tan\varphi}{\sin\beta_{cr}} = 3.00 \text{ m}$ 。则在 $0 \leq x \leq 3.00 \text{ m}$ 的区域内为空间效应的主要影响区域,取不同的 x 值进行计算,将得出的空间效应系数 K 值,将 K 值整理得出空间效应影响曲线,如图8所示。

在 $3 \text{ m} \leq x \leq 9 \text{ m}$ 区域内,为空间效应次要影响区域,将 $\beta_{cr} = 52^\circ, \varphi = 22^\circ$ 带入式(3)可得到相应的

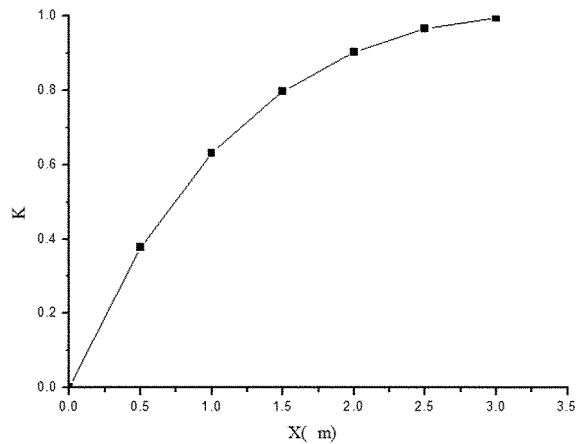


图8 区域内空间效应影响曲线

主动土压力 $P_a = 130.443 \text{ kN/m}$,相应的空间效应系数 $K = 0.9950$ 。

4 结语

随着城市不断发展,基坑深度不断增加,与以往较浅的基坑不同,深基坑具有明显的三维空间特点,在基坑两侧存在明显的空间效应,结合塑性势理论和相关联流动法则建立了基坑双层土体下空间效应的破坏模型,并在此模型的基础上对空间效应进行研究,并建立起相关的计算公式,主要结论如下:

- (1)根据土体塑性上下限极限定理,结合空间效应的破坏模型,推出双层土体的总土压力计算公式。
- (2)对双层土体的内摩擦角进行加权平均,采用杨雪强教授的理论方法求出空间效应影响系数 K 。

参考文献:

- [1] Ladd C C, Foott R, Stress - deformation and strength characteristics [D]. 1997:679 - 682
- [2] 张丙印. 高应力作用下粘土的特性及弹塑性本构关系 [D]. 北京:清华大学, 1988.
- [3] 马金荣. 深层土的力学特性研究 [D]. 中国矿业大学工学博士学位论文, 1998:43 - 48
- [4] 史宏彦, 谢定义. 用本构模型确定无粘性土的静止土压力系数 [J]. 岩石力学与工程学报, 2000, (6): 766 - 769.
- [5] 史宏彦, 谢定义, 汪闻韶. 确定无粘性土静止土压力系数的一个理论公式 [J]. 水利报, 2001, (4): 85 - 88.

Analysis on Spatial Effect of Double – layer Soil in Deep Foundation Pit

JIN Lu¹, DONG Junhao¹, WANG Chan²

(1. Shandong Urban and Rural Construction and Surveying Institute, Shandong Jinan 250014, China; 2. Shandong Geophysical and Geochemical Exploration Institute, Shandong Jinan 250013, China)

Abstract: Accompanying with continuous development of the city, foundation pit began to change from the traditional two – dimensional model to three – dimensional space model. Based on three dimensional failure mode of the pit wall soil, damage model of double – layer soil has been deduced. Based on this model, soil plasticity and limit equilibrium theory, calculation formula and relative spacial effect coefficient of earth pressure with considering of spatial effect have been put forward. This formula can be used for designing nailing wall, slope protection pile and underground continuous wall supporting system of foundation pit.

Key words: Deep foundation pit; spatial effect; limit equilibrium analysis; space earth pressure