

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2023.01.20

邻近基坑开挖及渗流条件下的主动土压力模型

李镜培¹, 施曙东², 郑笠¹, 姚建平²

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 上海南汇建工建设(集团)有限公司, 上海 201399)

摘要: 邻近基坑开挖和场地渗流条件变化均会改变先期施工基坑支护结构所受的土压力,进而引起结构变形,然而目前较少有同时考虑以上两个方面的土压力计算模型。基于极限平衡法,利用邻近基坑开挖边界与对数螺线滑动面间的几何关系,引入土体有效重度和吸力随场地渗流条件变化的计算理论,建立了考虑邻近基坑开挖及渗流条件下的主动土压力计算模型,结合基坑监测数据验证了模型的可靠性与合理性。计算分析表明:当邻近基坑深度不变时,主动土压力系数随基坑间距的增大先呈线性变化,随后先增大后减小,最后保持不变。当基坑间距不变时,主动土压力系数随邻近基坑深度的增加包含两种变化类型,一类是呈现先增大后减小的“山坡型”,另一类则是增大后保持不变。场地降雨渗流及地下水水位升高都将使土中吸力降低,从而导致主动土压力增大。本文研究成果对邻近基坑开挖的受力变形分析具有理论参考作用。

关键词: 邻近基坑; 主动土压力; 基坑间距; 极限分析; 场地渗流

中图分类号: TU43; TV16

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2023)01-0168-08

Active earth pressure model under adjacent foundation pit excavation and seepage condition

LI Jingpei¹, SHI Shudong², ZHENG Li¹, YAO Jianping²

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Shanghai Nanhui Construction Group Co., Ltd., Shanghai 201399, China)

Abstract: The excavation of adjacent foundation pit and the change of site seepage conditions will affect the earth pressure on the supporting structure of the foundation pit constructed previously, which in turn causes structural deformation. However, there are few earth pressure calculation models which consider the above two aspects at the same time. Based on the limit equilibrium method and the geometric relationship between the adjacent excavation boundary and the logarithmic spiral sliding surface, the calculation theory of the effective weight of soil and the change of suction with the seepage condition of the site is introduced to establish a calculation model of active earth pressure considering the adjacent pit excavation and seepage condition. Then the model is verified to be logical and reliable by the monitoring data. Parameter analysis shows that when the adjacent pit depth is constant, the active earth pressure coefficient first changes linearly with the increase of pit spacing, then increases and decreases, and finally stabilizes. When the pit spacing is constant, with the increase of the adjacent pit depth the active earth pressure coefficient presents two types of changes, one is the “hillside type”, which rises first and then declines; the other remains unchanged after rising. The rainfall seepage and the rise of groundwater level will reduce the suction stress in soil and lead to the increase of active earth pressure. The research results can provide a theoretical reference for the stress and deformation analysis of the foundation pit affected by the adjacent pit excavation.

Key words: adjacent foundation pit; active earth pressure; foundation pit spacing; limit analysis; site seepage

收稿日期:2022-05-30; 修回日期:2022-07-31

基金项目:上海市浦东新区城建系统科学技术研究项目(PCKY202005)

作者简介:李镜培(1963-),男,江西信丰人,教授,博士生导师,从事基坑工程和桩基础工程研究。

通讯作者:郑笠(1996-),男,福建漳州人,硕士研究生,从事边坡稳定性方面研究。

1 研究背景

我国城市基础设施建设已经进入了全新的立体化开发与利用阶段,高层建筑以及地下工程不断涌现,与之相伴随的是超大面积基坑工程数量的显著增加^[1-3]。超大面积基坑多采用分区开挖的方式进行施工以保证基坑的稳定性及施工进度,然而分区开挖基坑间距较小,邻近开挖将对先期施工基坑支护结构的受力变形产生显著影响。同时超大面积基坑由于长时间暴露施工,因降雨渗流所导致基坑支护结构显著变形的安全事故也屡见不鲜。

鉴于此,对渗流条件下邻近基坑开挖引起的先期施工基坑支护结构受力及变形进行定量分析具有必要性。许多学者针对相邻基坑开挖对土压力和支护结构变形的影响进行了研究。由于相邻基坑围护结构距离较近,作用于其上的土压力也明显呈现出有限宽度土压力的特性。夏明镗^[4]在分析相邻基坑土压力特点的基础上,运用室内模型试验,分析了有限宽度无黏性填土的变形特性和有限填土的破坏形式。刘新喜等^[5]采用沿小主应力迹线分层的方法,将挡墙后土体划分为若干个圆弧曲线薄层单元,建立了一种有限土体挡墙主动土压力理论分析模型。张恒志等^[6]基于离散元模拟结果对相邻基坑不同挡墙变位模式下的主动土压力、墙后土体破坏模式以及应力状态进行了分析。金亚兵等^[7]基于库仑土压力理论推导出非黏性土和黏性土在不同坡度和地面超载条件下主动土压力系数的计算公式,提出了临界宽度的概念和土条土压力折减系数的计算公式。陈小雨等^[8]以两相邻深基坑为工程背景,采用极限平衡理论和平面滑裂面假定,对坑间有限土体建立了土压力计算模型,给出了土压力保持不变时的基坑安全距离表达式。陈建旭等^[9]通过假定挡土墙后圆弧形土拱,采用水平层分析法对挡土墙平动模式下非极限主动土压力分布、合力、作用点高度进行了解答。邵鹏等^[10]利用极限平衡方程和微分方程推导了相邻围护结构间有限土体土压力的计算公式,并结合数值模拟对基坑施工过程中围护墙内力和变形进行了分析。郑刚^[11]分析了软土地区基坑工程施工各阶段变形特征和机理,针对邻近基坑施工的变形控制提出了主动控制理论,通过控制重点区域土体的应力和变形以达到降低邻近基坑施工对周边环境的影响的目的。同时,地下水渗流对土压力的影响也逐渐引起工程技术人员的重视^[12-14]。Vahedifard 等^[15]考虑支护墙后土体内渗

流的影响,采用极限分析法提出了计算非饱和稳流条件下支护结构主动土压力的解析框架。周璇等^[16]借助自主设计的模型试验箱开展稳定渗流下的有限宽度砂土土体主动土压力试验,并应用数值模拟进行验证,在此基础上系统地研究了稳定渗流作用下有限宽度砂土的主动土压力。

虽然目前关于邻近基坑间施工相互影响和土压力计算模型方面已有不少研究成果,但鲜有同时考虑邻近基坑开挖、场地渗流及地下水位变化等常见因素的土压力计算理论。因此,本文基于实际基坑工程中存在大小基坑、深浅基坑相邻开挖的特殊工况,结合现场动态监测数据和有限元数值模拟,构建邻近基坑施工条件下的主动土压力计算模型。同时,考虑土体非饱和特性,定量分析一维垂直渗流对主动土压力的影响,以期对相邻基坑设计及施工变形控制提供一定的理论拓展和参考。

2 主动土压力计算模型

极限平衡法结合对数螺旋线滑动面是边坡稳定性分析和土压力计算中常用的一类方法,该方法假定土体滑动面为从基坑坑底延伸出的对数螺旋线,基于静力平衡方程,通过不断假定潜在滑动面寻找安全系数或土压力系数极限值从而得到临界滑动破坏面。极限平衡法滑动破坏模型如图 1 所示。

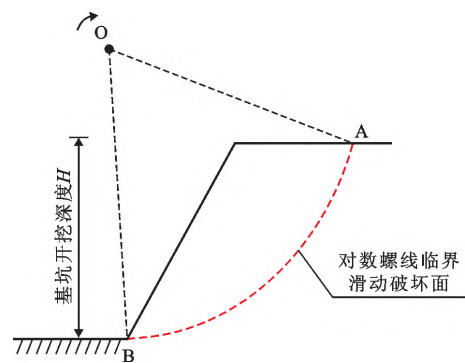


图 1 极限平衡法对数螺旋线滑动破坏模型

若实际工程中同一场地由两个基坑组成并先后施工,且基坑间距较小时,则邻近基坑在施工时将使原滑动面 AB 发生改变,该情况下土压力计算模型见图 2。如图 2 所示,当先期施工基坑右侧存在邻近开挖基坑时,原滑动面曲线 AB 将由于基坑开挖而缩短为 FB,此时若继续沿用原临界滑动面曲线 AFB 对应的静力平衡方程求解土压力系数,则不能保证获得主动土压力的极限值。此外,大量实际基坑工程项目及研究结果表明,基坑在施工过程中受

到降雨及场地降水的影响时,基坑支护结构侧向变形速率明显加快,而采用传统主动土压力计算公式并不能反映以上基坑工程中的常见问题。因此本文对传统极限平衡法进行改进,通过邻近开挖后两基坑间的几何关系构造静力平衡方程并引入在不同渗流及地下水位条件下土体吸力应力及有效重度计算公式,使改进后的极限平衡法能够应用于考虑邻近基坑开挖及渗流条件下的主动土压力计算。

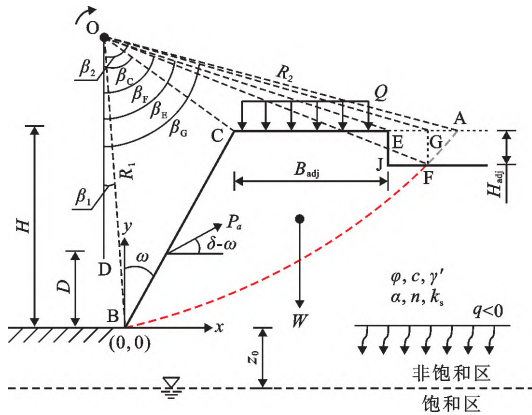


图2 相邻两基坑施工的土压力计算模型示意图

参考图2所示的改进后的极限平衡法滑动破坏模型,BC左侧是开挖深度为H的先期施工基坑,支护结构与垂直面间夹角为 ω ,支护结构与土体间摩擦角为 δ ;右侧EJF是开挖深度为 H_{adj} 的邻近施工基坑,两基坑间距为 B_{adj} ,地表超载为 Q ,地下水水位与先期施工基坑坑底距离为 z_0 ,垂直渗流强度为 q 。

土压力计算模型包含的主要假设如下:

(1) 滑动破坏面为从坑底延伸出的对数螺线,极径计算公式为:

$$R = R_0 e^{-\psi\beta} \quad (1)$$

式中: β 为对数螺旋的转角, ($^\circ$); ψ 为常数,取值为 $\tan \varphi$, φ 为土体的有效内摩擦角, ($^\circ$); 参数 R_0 由边坡的几何条件确定,相当于 $\beta = 0^\circ$ 时的对数螺线极径, m。

(2) 邻近基坑平面尺寸远大于先期施工基坑。

(3) 场地只存在一维垂直渗流。

(4) 主动土压力的合力作用于先期施工基坑高度的1/3处,合力方向与水平面夹角为 $\delta - \omega$ 。依据计算主动土压力的静力平衡方程,需考虑主动土压力、吸力应力、土体有效重度、黏聚力和地面超载对图2中点O的弯矩平衡,即:

$$M_{P_a} + M_{\sigma^s} + M_W - M_c + M_Q = 0 \quad (2)$$

式中: M_{P_a} 为主动土压力合力 P_a 的平衡弯矩, $\text{kN} \cdot \text{m}$; M_{σ^s} 为土体基质吸力 σ^s 的平衡弯矩, $\text{kN} \cdot \text{m}$; M_W 为

土体有效自重 W 的平衡弯矩, $\text{kN} \cdot \text{m}$; M_c 为土体黏聚力 c 的平衡弯矩, $\text{kN} \cdot \text{m}$; M_Q 为地面超载 Q 的平衡弯矩。需要指出的是,根据朗肯主动土压力理论,在滑裂面顶部可能会产生拉裂缝,在计算中宜考虑这部分拉裂缝产生的弯矩,但由于该部分弯矩对计算结果影响较小,同时本文主要讨论邻近基坑施工及渗流条件对主动土压力的影响,因此在推导过程中不考虑拉裂缝的弯矩损失。

2.1 主动土压力产生的平衡弯矩

主动土压力的合力 P_a 计算公式为:

$$P_a = \frac{1}{2} K_a \bar{\gamma}' H^2 \quad (3)$$

式中: K_a 为主动土压力系数; $\bar{\gamma}'$ 为计算深度范围支护结构墙后土体有效重度 γ' 的平均值, kN/m^3 。

$\bar{\gamma}'$ 的数值与土体的饱和度、土粒比重 G_s 、孔隙比 e 及水的重度 γ_w 等物理参数相关,按公式(4)、(5)计算^[17]:

$$\gamma' = \frac{G_s + [S_r + (1 - S_r)S_e]e}{1 + e} \gamma_w \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \bar{\gamma}' &= \frac{1}{H} \int_0^H \gamma' dz \\ &= \frac{1}{H} \int_0^H \frac{G_s + [S_r + (1 - S_r)S_e]e}{1 + e} \gamma_w dz \end{aligned} \quad (5)$$

其中 S_e 为Lu等^[17-18]定义的土体有效饱和度,其计算公式为:

$$S_e = \left\{ 1 - \left\{ \ln \left[\left(1 + \frac{q}{k_s} \right) e^{-\alpha \gamma_w (z+z_0)} - \frac{q}{k_s} \right] \right\}^n \right\}^{-\frac{n-1}{n}} \quad (6)$$

式中: S_r 为残余饱和度, Lu等^[18]通过实验给出了各种土类在不同湿润路径下的残余饱和度, S_r 值通常较小^[15],为简化计算,本研究取 $S_r = 0.1$; e 为土体孔隙比; q 为垂直渗流强度,方向向上蒸发为正,向下渗透为负,无渗流条件为0, cm/s ; k_s 为饱和土体渗透系数, cm/s ; z 为土压力计算点与滑动面底部的垂直距离, m。 α, n 均根据水土特征曲线拟合得到^[19-21], α 近似为进气压力的倒数,取值多在0 ~ 0.5 kPa^{-1} 之间, n 为土壤孔径分布参数,多数土壤孔径分布参数在1.1 ~ 8.5之间,其取值可根据土体分类参考图3确定^[15]。

于是主动土压力合力的平衡弯矩 M_{P_a} 表达式为:

$$\begin{aligned} M_{P_a} &= \frac{1}{2} K_a \bar{\gamma}' H^2 \left[\cos(\delta - \omega) \left(R_1 \cos \beta_1 - \frac{H}{3} \right) + \right. \\ &\quad \left. \sin(\delta - \omega) \left(R_1 \sin \beta_1 + \frac{H}{3} \tan \omega \right) \right] \end{aligned} \quad (7)$$

式中: R_1 为图 2 中极半径 OB 的长度, m; β_1 为对数螺线起始转角, 即图 2 中 $\angle DOB$ 的角度, ($^\circ$)。

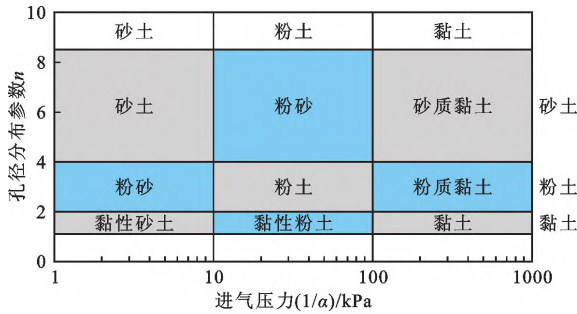


图 3 土壤孔径分布参数 n 的取值

2.2 基质吸力产生的平衡弯矩

基质吸力垂直作用于滑动面切线, 其平衡弯矩 M_{σ^s} 的表达式为:

$$M_{\sigma^s} = \int_{\beta_1}^{\beta_2} \sigma^s R_0 e^{-2\psi\beta} \cos \beta (-\psi \cos \beta + \sin \beta) d\beta - \int_{\beta_1}^{\beta_2} \sigma^s R_0 e^{-2\psi\beta} \sin \beta (\cos \beta - \psi \sin \beta) d\beta \quad (8)$$

其中: σ^s 为基质吸力, 其计算公式为^[18]:

$$\sigma^s = \frac{\ln \left[\left(1 + \frac{q}{k_s} \right) e^{-\alpha \gamma_w (z+z_0)} - \frac{q}{k_s} \right]}{\alpha \left(1 + \left\{ -\ln \left[\left(1 + \frac{q}{k_s} \right) e^{-\alpha \gamma_w (z+z_0)} - \frac{q}{k_s} \right] \right\}^n \right)^{\frac{n-1}{n}}} \quad (9)$$

式中: β_2 为对数螺线终止转角, 即图 2 中 $\angle DOA$ 的角度, ($^\circ$)。

2.3 土体自重产生的平衡弯矩

土体自重采用有效重度, 方向垂直向下, 其平衡弯矩 M_W 的表达式为:

$$M_W = \int_{\beta_1}^{\beta_c} \int_{d_1}^R \gamma' r^2 \sin \beta dr d\beta + \int_{\beta_c}^{\beta_2} \int_{d_2}^R \gamma' r^2 \sin \beta dr d\beta \quad (10)$$

式中: β_c 为图 2 中 $\angle COD$ 的角度, ($^\circ$); d_1 和 d_2 分别为对数螺线极半径与 BC 和 AC 表面的交点到点 O 的距离, m; r 为积分区域 ABC 中计算点到点 O 的距离, m。

β_c 、 d_1 、 d_2 的计算公式为:

$$B_c = \operatorname{acot} \left(\frac{R_1 \cos \beta_1 - H}{H \tan \omega + R_1 \sin \beta_1} \right) \quad (11)$$

$$d_1 = \frac{R_2 \sin(\beta_1 + \omega)}{\sin(\beta + \omega)} \quad (12)$$

$$d_2 = \frac{R_1 \cos \beta_2}{\cos \beta} \quad (13)$$

式中: R_2 为图 2 中极半径 OA 的长度, m。

2.4 黏聚力产生的平衡弯矩

土体黏聚力 c 沿滑动面分布, 方向与滑动面相切, 其平衡弯矩 M_c 的表达式为:

$$M_c = c \left[\int_{\beta_1}^{\beta_2} R_0 e^{-2\psi\beta} \sin \beta (\psi \cos \beta + \sin \beta) d\beta + \int_{\beta_1}^{\beta_2} R_0 e^{-2\psi\beta} \cos \beta (\cos \beta - \psi \sin \beta) d\beta \right] \quad (14)$$

2.5 地面超载产生的平衡弯矩

地面超载 Q 分布于图 2 中的 EC 部分, 方向垂直向下, 其平衡弯矩 M_Q 的表达式为:

$$M_Q = \frac{1}{2} Q (R_2 \sin \beta_2 - R_1 \sin \beta_1 - H \tan \omega) \cdot (R_2 \sin \beta_2 + R_1 \sin \beta_1 + H \tan \omega) \quad (15)$$

2.6 邻近基坑开挖引起的平衡弯矩损失

为构建邻近基坑存在时先期施工基坑的主动土压力计算模型, 需考虑由于基坑开挖造成如图 2 中 AEJF 部分的平衡弯矩缺失, 在构建静力平衡公式 (2) 时需减去 AEJF 部分的基质吸力应力、土体自重、黏聚力以及地面超载对 O 点的平衡弯矩损失。其中 AGF 部分可视为与原滑动破坏模型形状相同的小滑动块, 其弯矩损失计算原理与公式 (8) ~ (15) 相同, 分别记为 M_{σ^s-AGF} 、 M_{W-AGF} 、 M_{c-AGF} 和 M_{Q-AE} , 计算时需将原式中相关参数 β_1 、 β_2 及 β_c 对应替换为 β_E 、 β_F 及 β_C , 按公式 (16) ~ (19) 求解。

$$\beta_E = \operatorname{acot} \left(\frac{R_1 \cos \beta_1 - H}{B_{\text{adj}} + H \tan \omega + R_1 \sin \beta_1} \right) \quad (16)$$

$$R_0 e^{-\psi\beta_F} \sin \beta_F - B_{\text{adj}} - H \tan \omega - R_1 = 0 \quad (17)$$

$$R_0 e^{-\psi\beta_F} \cos \beta_F - H_{\text{adj}} - R_2 \cos \beta_2 = 0 \quad (18)$$

$$\beta_C = \operatorname{acot} \left(\frac{R_1 \cos \beta_1 - H}{R_0 e^{-\psi\beta_F} \sin \beta_F} \right) \quad (19)$$

EJFG 滑动块为矩形, 需计算该部分土体有效自重对点 O 的弯矩损失, 计算公式为:

$$M_{W-EJFG} = \frac{1}{2} \int_{R_F \cos \beta_F}^{R_2 \cos \beta_2} \gamma'(z) (R_2 \cos \beta_2 + B_{\text{adj}} + H \tan \omega + R_1 \cos \beta_1) dz \quad (20)$$

将弯矩损失部分代入公式 (2) 得到邻近基坑存在时的静力平衡方程:

$$M_{P_a} = (M_{\sigma^s} - M_{\sigma^s-AGF}) + (M_W - M_{W-AGF} - M_{W-EJFG}) - (M_c - M_{c-AGF}) + (M_Q - M_{Q-AE}) \quad (21)$$

上述 M_{P_a} 计算中含主动土压力系数 K_a , 可将 K_a 化简为 β_1 和 β_2 的函数, 根据主动土压力定义, 通过对 β_1 和 β_2 进行逐步增量假定不同的滑动面, 计算并寻找全局 K_a 的极大值, 即可确定实际主动土压力系

数及最危险滑动面。

3 工程验证

本节将模型计算结果与工程实测监测数据进行对比以验证土压力计算理论模型的合理性。上海国际医学园区医药加速器(一期)项目位于上海市浦东新区,基坑总面积达 32 242 m²,总延长米为 899 m。根据基坑的面积、开挖深度及功能分区,将基坑划分为 A、B 两个区域。其中,A 区基坑面积为 3 326 m²,

延长米约为 232 m,开挖深度为 11.85 m;B 区基坑面积为 28 916 m²,延长米约为 667 m,开挖深度为 6.75 m。基坑平面图及相关监测点布置如图 4 所示。

基坑施工过程中为减小 B 区超大面积基坑开挖对 A 区基坑的影响,对 B 区基坑采用分区开挖施工方案,分区如图 5 所示。其中 A 区包括 1 区-1 及 1 区-3,其余为 B 区,实际施工中在 A 基坑与 B 基坑之间保留 20 m 间距的 1 区-5 及 1 区-6 不开挖,分区开挖施工进度如表 1 所示,主要土层参数如表 2 所示。

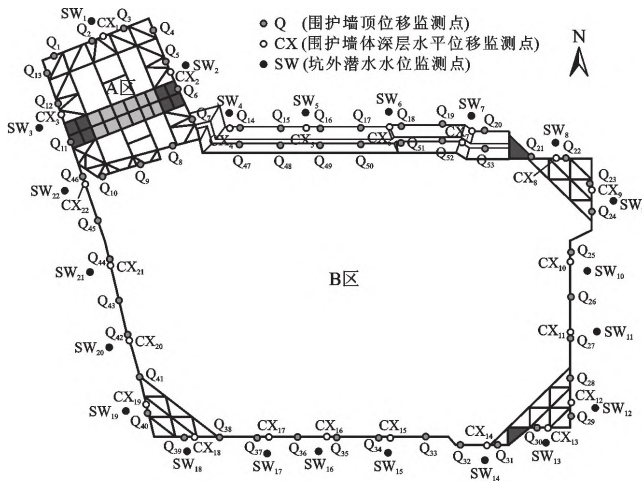


图 4 实例工程基坑平面图及监测点布置

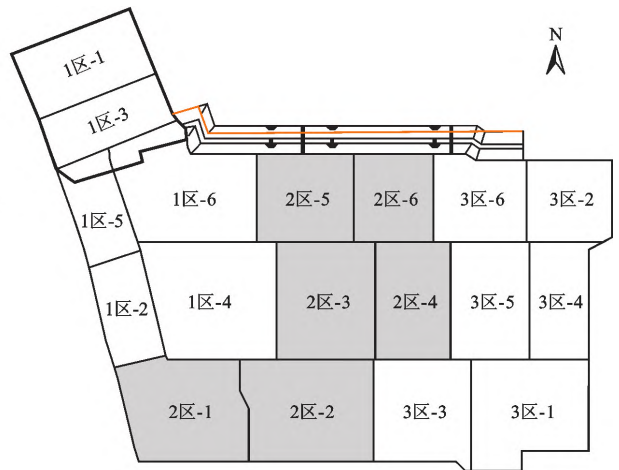


图 5 实例工程土方施工分区示意图

表 1 实例工程基坑开挖施工进度

施工阶段	起止时间	施工内容
1	2020-09-01 至 2020-09-30	1 区-1、1 区-3 区开挖及第 1 道内支撑施工
2	2020-09-30 至 2020-11-11	1 区-1、1 区-3 区开挖及第 2 道支撑施工
3	2020-10-12 至 2020-10-18	2 区、1 区-2 开挖
4	2020-10-19 至 2020-10-26	2 区、1 区-4 开挖
5	2020-11-12 至 2021-12	1 区-1、1 区-3 区基坑开挖至坑底

表 2 实例工程场地土层参数

层号	土层名称	天然重度 $\gamma /$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	强度参数		土层厚度/ m
			c' / kPa	$\varphi' / (^\circ)$	
②	灰黄色黏土	18.3	19	18.5	1.4
③	灰色淤泥质粉质黏土	17.6	14	17.5	5.7
④	灰色淤泥质黏土	16.6	12	10.5	8.1
⑤	灰色黏土	17.4	15	11.5	9.0
⑥	草黄色粉质黏土	19.4	36	18.5	3.0
⑦	灰色粉砂	18.8	2	32.5	28.0

现场监测数据主要包括围护墙顶及深层水平位移,而在 A、B 区基坑交界处,只有围护墙顶位移测点 Q_8 、 Q_9 和 Q_{10} ,为便于将主动土压力系数计算结

果与实例工程监测数据进行对比,进一步采用《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—2012)中推荐的弹性支点法计算支护结构水平位移,土压力分布采用

矩形分布模式,开挖面以上土压力值线性增加,开挖面以下土压力值不变,水平位移计算方法可参考文献[22],参数取值根据现场施工情况选取,如表 3 所示。

表 3 实例工程验证计算参数取值

参数	取值	参数	取值
先期施工基坑深度 H/m	11.85	墙土间摩擦角 $\delta/(\circ)$	10
支护夹角 $\omega/(\circ)$	0	土体天然重度 $\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	18.1
排桩支护长度 L/m	26.85	土层内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	23
排桩直径 d_p/m	1.0	土层黏聚力 c/kPa	9.1
排桩间距 b_a/m	1.2	非饱和参数 n	2
内支撑面积 A_{su}/m	0.8	非饱和参数 α/kPa^{-1}	0.005
内支撑深度 H_{su}/m	-1.2, -5.6	土体孔隙比 e	0.7
基坑间距 B_{adj}/m	10,15,20	渗流强度比 q/k_s	0
邻近基坑深度 H_{adj}/m	6.2	地下水位 z_0/m	-1.5

注:(1) 土层参数依据土层厚度取平均值;(2) 墙土间摩擦角 δ 取 $\varphi/2$ [9]。

图 6 显示了 Q_9 、 Q_{10} 监测点处在邻近基坑(1 区-4) 开挖过程中围护墙顶水平位移变化量与理论计算结果的对比。从图 6 可以看到,随着 1 区-4 开挖深度的增加, Q_9 、 Q_{10} 监测点水平位移逐渐增大后保持稳定,其中 Q_9 监测点最大位移变化量为 4 mm, Q_{10} 监测点最大位移变化量为 2 mm。基坑间距 $B_{adj} = 10\text{ m}$ 和 $B_{adj} = 15\text{ m}$ 时,曲线围护结构顶部位移变化量的模型计算值与监测数据近似,稳定后位移数值分别为 2.4 和 1.7 mm。 $B_{adj} = 20\text{ m}$ 时,计算值与实际基坑间距基本相同,模型计算结果显示邻近基坑开挖对先期施工基坑支护结构已无影响,围护顶部未产生位移变化。实际施工中 1 区-4 距离监测点达到 20 m,但该区域开挖时仍然引起监测点数据的变化,与理论计算结果有所不同。笔者认为差异主要来自于两个方面:首先理论模型中假定滑动破坏面起始点位于基坑坑底处,未考虑滑动面延伸至坑底以下,对整体刚度较大的支护结构而言,将滑动面延伸至基坑坡趾以下更为合理[23-24];其次理论模型适用于二维平面应变情况,与实际三维基坑存在差异。但总体上来看,采用本文土压力理论计算模型对基坑支护结构变形变化趋势的预测与监测数据基本一致。

4 主动土压力影响因素分析

本节基于土压力计算模型对邻近基坑不同施工参数及不同渗流条件下先期施工基坑的主动土压力系数变化情况开展参数分析,主要讨论基坑间距、邻近基坑

开挖深度、地下水水位、渗流强度对主动土压力系数计算结果的影响。分析涉及的参数取值见表 4。

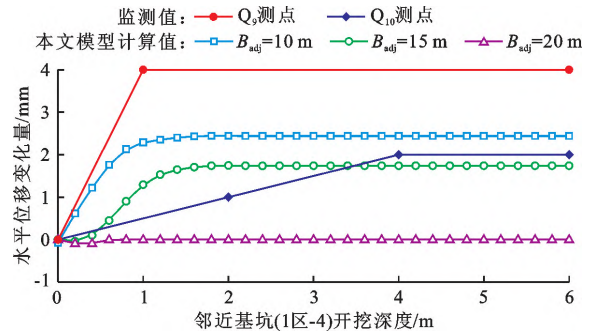


图 6 Q_9 、 Q_{10} 监测点水平位移变化量监测数据与本文模型计算结果对比

表 4 主动土压力影响因素分析基本计算参数取值

参数	取值	参数	取值
先期施工基坑深度 H/m	10	墙土间摩擦角 $\delta/(\circ)$	10
支护夹角 $\omega/(\circ)$	0	土体天然重度 $\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	18
排桩支护长度 L/m	20	土层内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	10
排桩直径 d_p/m	1.0	土层黏聚力 c/kPa	10
排桩间距 b_a/m	1.2	非饱和参数 n	2
内支撑面积 A_{su}/m	0.5	非饱和参数 α/kPa^{-1}	0.005
内支撑深度 H_{su}/m	-1.2	土体孔隙比 e	0.7
基坑间距 B_{adj}/m	5	渗流强度比 q/k_s	-1
邻近基坑深度 H_{adj}/m	5	地下水位 z_0/m	2

4.1 邻近基坑施工参数的影响

本节邻近基坑施工参数主要指基坑间距和邻近基坑深度。图 7 为不同邻近基坑开挖深度 H_{adj} 下,先期施工基坑的主动土压力系数 K_a 随基坑间距 B_{adj} 的变化曲线;图 8 为不同基坑间距 B_{adj} 下,先期施工基坑的主动土压力系数 K_a 随邻近基坑深度 H_{adj} 的变化曲线。

从图 7 可以看出,主动土压力系数随基坑间距增加均呈现 3 个变化阶段,以邻近基坑深度 $H_{adj} = 5\text{ m}$ 的曲线为例,第 1 阶段 B_{adj} 在 0 ~ 1.8 m 之间,主动土压力系数呈线性减小;第 2 阶段 B_{adj} 在 1.8 ~ 11.0 m 之间,主动土压力系数呈先上升达到峰值后再下降的“山坡型”变化,在 $B_{adj} = 5\text{ m}$ 时土压力系数达到最大值; B_{adj} 大于 11 m 后为第 3 阶段,该阶段主动土压力系数不再随基坑间距的增大而发生变化,其值约为峰值的 90%。不同邻近基坑深度对主动土压力系数的影响规律有所不同,体现在 3 个方面:一是随着邻近基坑开挖深度的增加,第 1 阶段所覆盖的基坑间距范围减小,第 2 阶段土压力系数增大段的覆盖范围扩大,但第 3 阶段起始的基坑间距

及稳定后的主动土压力系数保持不变;二是对于邻近基坑开挖深度较大的情况下(如 $H_{adj}=9\text{ m}$),当基坑间距较小时,邻近基坑对先期施工基坑的卸荷作

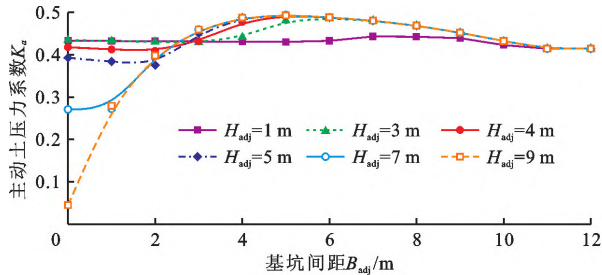


图7 不同邻近基坑深度下主动土压力系数随基坑间距的变化曲线

从图8可以看出,不同基坑间距下主动土压力变化规律较为复杂,如图中 $B_{adj}=5\text{ m}$ 的曲线,主动土压力系数随着邻近基坑深度 H_{adj} 的增加而逐渐增大,当 $H_{adj}>4\text{ m}$ 后不再发生变化,而 $B_{adj}=1\text{ m}$ 的曲线则表现为先增大后减小且当 $H_{adj}>7.2\text{ m}$ 后保持不变的“山坡型”变化规律。上述曲线变化趋势的差异也可以通过观察滑动破坏面的变化情况进行解释。

以上分析表明,主动土压力系数值与邻近基坑施工参数对主动土压力的影响相互耦合,规律较为

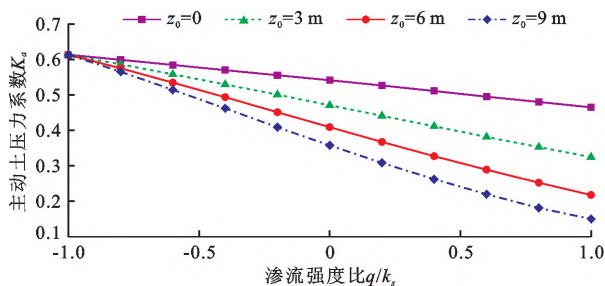


图9 不同深度地下水水位时主动土压力系数随渗流强度比的变化曲线

从图9可以看出,主动土压力系数随渗流强度比的提高而呈现近似线性减小的变化趋势,这表明降雨渗流将增大支护结构所受的主动土压力,这与相关文献^[25-26]中对非饱和土基坑的安全性与稳定性分析结果相一致。同时图9表明,渗流强度比 $q/k_s=-1.0$ 时,不同地下水水位下的主动土压力系数相同,这是由于此时在吸力计算公式(9)中 $\sigma^s=0$,土体达到了饱和状态。图10显示主动土压力系数随地下水水位的降低而减小,蒸发渗流将导致主动土压力减小速度加快。

根据以上关于渗流条件和地下水水位对土压力系数影响的分析,可以认为当渗流条件及地下水水

用更加显著,主动土压力系数明显小于邻近基坑较浅的情况;三是随着邻近基坑开挖深度的增加,主动土压力系数峰值有所增大。

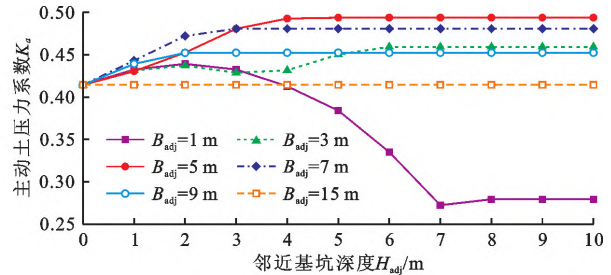


图8 不同基坑间距下主动土压力系数随邻近基坑深度的变化曲线

复杂,在设计基坑分区开挖或邻近基坑近距离施工时,要尽量避免使先期施工基坑在某一组邻近基坑施工参数下受到较大的主动土压力作用。

4.2 渗流条件及地下水水位的影响

图9为不同深度地下水水位时,先期施工基坑的主动土压力系数 K_a 随渗流强度比 q/k_s 的变化曲线;图10为不同渗流强度比时,先期施工基坑的主动土压力系数 K_a 随地下水水位深度的变化曲线。渗流强度比 q/k_s 为正时表示蒸发,为负时表示降雨,其绝对值则反映渗流强度的大小。

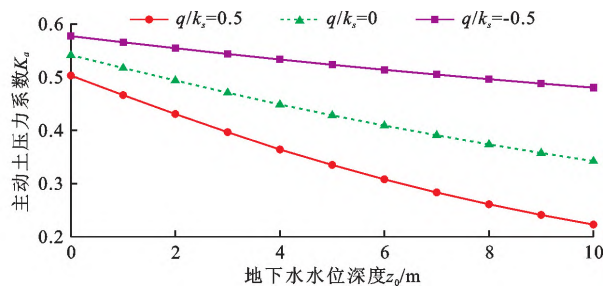


图10 不同渗流强度比时主动土压力系数随地下水水位深度的变化曲线

位变化引起土体吸力增大时,吸力作为抗力将使基坑支护结构所受的主动土压力减小。

5 结论

本文对极限分析法进行拓展,建立了考虑邻近基坑及场地渗流条件的主动土压力计算模型,分析了不同邻近基坑施工参数(邻近基坑开挖深度和基坑间距)、施工场地地下水水位、渗流条件等对主动土压力系数计算结果的影响,主要结论如下:

(1)通过计算结果与现场监测数据对比,验证了改进的主动土压力计算模型用于基坑围护结构位移计算的有效性,其能够较为合理地反映邻近基坑

施工和降雨渗流对先期施工基坑支护结构所受主动土压力的影响。

(2) 邻近基坑深度不变时, 主动土压力系数随基坑间距的增大呈现 3 个变化阶段: 第 1 阶段线性减小或增大, 主要取决于邻近基坑深度的大小, 加大邻近基坑深度将使第 1 阶段所覆盖的基坑间距范围逐渐减小以至消失; 第 2 阶段呈现先增大后减小的“山坡型”变化规律, 期间主动土压力系数达到极值; 第 3 阶段主动土压力系数保持不变。

(3) 基坑间距不变时, 主动土压力系数与邻近基坑深度间的变化关系较为复杂, 主要包含两种类型, 一类随邻近基坑深度的增加呈现先增大后减小的“山坡型”, 另一类则是增大后保持不变, 变化类型主要取决于基坑间距值, 其共同规律在于当邻近基坑深度大于某一数值后, 继续加大邻近基坑深度对主动土压力系数不再产生影响。

(4) 场地渗流条件及地下水水位的变化同样会引起支护结构所受土压力的改变。通过降低场地内地下水水位, 降低降雨渗流强度能够增加非饱和土体的内吸力, 从而有效降低支护结构所受的主动土压力。

参考文献:

- [1] 伍浩, 王毅军, 王海, 等. 大面积基坑开挖回弹简化计算方法[J]. 土木工程学报, 2020, 53(S1): 361-366.
- [2] 何忠明, 王盘盘, 王利军, 等. 超大深基坑开挖变形演化规律及优化设计[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2022, 19(3): 69-77.
- [3] 吴坤. 环形支撑体系在超大异形深基坑中的应用研究[J]. 铁道工程学报, 2022, 39(6): 50-55.
- [4] 夏明铤. 基坑地连墙后有限土受力特性试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(2): 546-553.
- [5] 刘新喜, 李彬, 王玮玮, 等. 基于主应力迹线分层的有限土体土压力计算[J]. 岩土力学, 2022, 43(5): 1175-1186.
- [6] 张恒志, 徐长节, 何寨兵, 等. 基于离散元方法的不同挡墙变位模式下有限土体主动土压力研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(1): 257-267.
- [7] 金亚兵, 刘吉波. 相邻基坑土条土压力计算方法探讨[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3759-3764.
- [8] 陈小雨, 袁静, 胡敏云, 等. 相邻深大基坑安全距离理论分析与数值模拟[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(5): 1557-1564+1572.
- [9] 陈建旭, 宋文武. 平动模式下挡土墙非极限主动土压力[J]. 岩土力学, 2019, 40(6): 2284-2292.
- [10] 邵鹏, 朱春柏, 潘静杰, 等. 基坑群间有限土压力及支护结构相互作用研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(S1): 187-195.
- [11] 郑刚. 软土地区基坑工程变形控制方法及工程应用[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(1): 1-36+201.
- [12] 孔令青. 考虑渗流影响的基坑支护结构受力及稳定性分析[D]. 石家庄: 河北地质大学, 2019.
- [13] 张军, 冯佳蕊, 翟少磊. 洞庭湖大桥锚定基坑降水及对地连墙影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(S1): 256-262.
- [14] 任延寿. 考虑渗流影响的深基坑开挖模拟与监测分析[J]. 中国港湾建设, 2018, 38(7): 30-34.
- [15] VAHEDIFARD F, LESHCHINSKY A, MORTEZAEI K, et al. Active earth pressures for unsaturated retaining structures[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2015, 14(11): 04015048.
- [16] 周璇, 方焘, 雷祖祥. 稳定渗流作用下有限宽度砂土主动土压力研究[J]. 华东交通大学学报, 2021, 38(2): 17-21.
- [17] LU Ning, GODT J W, WU D T. A closed-form equation for effective stress in unsaturated soil[J]. Water Resources Research, 2010, 46(5): 567-573.
- [18] LU Ning, LIKOS W J. Suction stress characteristic curve for unsaturated soil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(2): 131-142.
- [19] MUALEM Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media[J]. Water Resources Research, 1976, 12(3): 513-522.
- [20] LU Ning, LIKOS W J. Unsaturated soil mechanics[M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 2004.
- [21] GENUCHTEN V T M. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892-898.
- [22] 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.
- [23] CHEN Haohua, LI Jingpei, YANG Changyi, et al. A theoretical study on ground surface settlement induced by a braced deep excavation[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2020, 26(5): 1897-1916.
- [24] LESHCHINSKY D, EBRAHIMI S, VAHEDIFARD F, et al. Extension of Mononobe-Okabe approach to unstable slopes[J]. Soils and Foundations, 2012, 52(2): 239-256.
- [25] 师晨翔, 金文, 杨永平, 等. 考虑土体吸力基坑抗隆起稳定性极限上限分析[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(1): 303-310.
- [26] 孙振华, 姜闯, 辛全明, 等. 降雨对非饱和粉质粘土基坑土水特性及稳定性的影响研究[J]. 工程勘察, 2021, 49(11): 6-12+47.