

文章编号: 1000-7598 (2010) 05-1579-07

长大深基坑施工空间效应研究

雷明锋, 彭立敏, 施成华, 安永林

(中南大学 土木建筑学院, 长沙 410075)

摘 要: 针对目前长大深基坑施工空间效应的研究主要集中在数值模拟方面, 理论研究尚不多见的现状, 提出了黏性土条件下长大深基坑施工空间效应的简化计算方法。引入等代内摩擦角的概念, 将基坑坑周土层等代为无黏性均质体, 应用土的塑性上限理论及相关联流动法则, 采用极限平衡分析法, 对长大深基坑拉裂-剪切和纯剪切两种三维破坏模式下的空间效应进行了具体研究, 给出了相应的空间效应系数计算公式, 并进行了算例分析。研究结果表明, 该方法避免了数值模拟的低效率、高费用、长周期的缺陷, 可手算完成; 计算成果能直接得出基坑坑壁空间效应系数的分布特征及量值大小, 可用于指导基坑支护结构、施工方案的设计以及信息化监测测点布置和断面选择。

关 键 词: 长大深基坑; 空间效应; 简化计算; 塑性上限理论; 相关联流动法则; 等代内摩擦角; 极限平衡分析法
中图分类号: U 455.55 **文献标识码:** A

Research on construction spatial effects in large-long-deep foundation pit

LEI Ming-feng, PENG Li-min, SHI Cheng-hua, AN Yong-lin

(School of Civil and Architectural Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: According to the research status of construction spatial effects in large-long-deep foundation pit that is mainly focusing on the numerical simulation, but theoretical research is not too many till now. A simplified method for calculating the construction spatial effects of large-long-deep foundation pit in cohesive soil was advanced. The soil layers around deep foundation pit were equal to cohesionless isotropic soil mass by introducing the concept of equivalent internal friction angle. And then, by means of limit equilibrium analysis method combined with soil plasticity upper bound theory and associated flow rule, the spatial effects of two 3D failure modes: tension crack-shear and pure shear in deep foundation pit were studied concretely; and the corresponding formulas of spatial effects coefficient were put forward; also two examples were analyzed. The research results indicate that the method, which can complete by hand-calculation, avoids the defects of low efficiency, high cost and long period in numerical simulation, and the distribution characteristics and value size of spatial effects coefficient could be obtained directly from its calculation results, which can be used as guidance for the supporting structure, construction scheme design and the test points or sections choice in process of information monitoring.

Key words: large-long-deep foundation pit; spatial effects; simplified calculation; soil plasticity upper bound theory; associated flow rule; equivalent internal friction angle; limit equilibrium analysis method

1 前 言

目前深基坑支护常忽略其空间效应带来的影响, 将其视为平面问题, 较多地借助传统的朗肯或库仑土压力理论进行支护系统的设计^[1-10], 往往是偏于保守的。事实上, 深基坑本身是一个具有长、宽和深尺寸的三维空间结构, 因而其支护系统的设计是一个复杂的三维空间受力问题^[11-12]。大量的工程实践证明, 深基坑坑壁中央范围的土压力和位移

值均大于两坑壁端部一定范围的土压力和位移值, 说明在深基坑两端壁处存在显著的空间效应, 抑制了其邻近区域的土压力和位移的发展。对于该效应的研究, 国内外科技工作者已进行了一定的探讨, 例如, 文献[13-14]采用空间弹性抗力法计算模型, 探讨了圈(帽)梁对基坑空间效应的影响规律; 文献[15]基于三维有限元数值模型研究了基坑开挖过程中, 围护结构、土压力的空间分布及基坑几何尺寸效应; 文献[16]同样通过有限元方法, 着重阐述

收稿日期: 2008-11-24

第一作者简介: 雷明锋, 男, 1983年生, 博士研究生, 主要从事隧道及地下工程结构理论研究与应用工作。E-mail: mingfenglei@yahoo.com.cn

通讯作者: 施成华, 男, 1973年生, 博士, 副教授, 主要从事隧道与地下工程方面的教学与科研工作。

了阳角、阴角及分段、分层开挖法对土体位移和锚杆轴力的影响,但目前的研究成果及方法主要集中在数值模拟方面,即通过建立有效的空间模型,分析围护结构的空问受力性态来间接地说明空间效应的存在以及不同因素对其的影响,而理论研究成果尚不多见,特别是如何直接定量计算空间效应方面的报道极少。

本文借助于基坑坑壁土体三维破坏模式,基于土的塑性上限理论及相关联流动法则,引入等代内摩擦角,采用极限平衡分析法,对黏性土条件下长、大、深基坑施工空间效应的计算方法进行了推导,以指导类似工程的设计与施工。

2 深基坑坑壁土体破坏模式

杨雪强等^[17-18]对深基坑坑壁土体的破坏模式进行了详细地研究,他认为,对于均质土体,由于受到两坑壁端部的约束作用,深基坑坑壁土体的整体破坏呈三维的失稳状态。同时,根据土体运动的相容、连续条件,认为基坑土体破坏模式分为:拉裂-剪切破坏型和纯剪切破坏型,如图 1、2 所示。其判断条件为:当 $B-2q \geq 0$ 时,为纯剪切破坏型;当 $B-2q < 0$ 时,为拉裂-剪切破坏型,其中 B 为基坑开挖长度; q 意义见图。

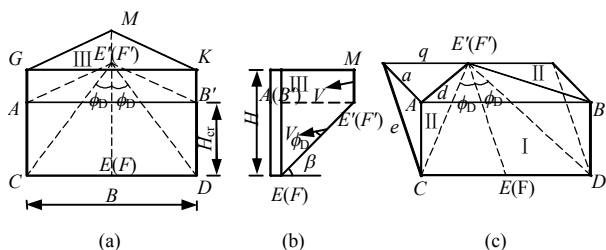


图 1 坑壁土体拉裂-剪切三维破坏模式

Fig.1 Tension crack-shear 3-D failure mode of pit wall soil mass

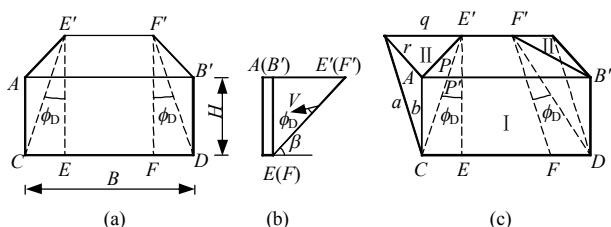


图 2 坑壁土体纯剪三维破坏模式

Fig.2 Pure shear 3D failure mode of pit wall soil mass

3 基本假定和简化

为便于推导,进行了如下简化和假设:

(1) 对于一定间距的基坑围护桩,因桩净距较小,可把非连续的围护桩支护结构按照等刚度法等

效为一连续的挡土墙体结构。

(2) 引入等代内摩擦角的概念将黏性土等代为无黏性土,计算过程中采用土的抗剪强度相等的等代法^[19]进行,具体公式为

$$\phi_D = \arctan \left(\tan \phi + \frac{c}{\gamma h} \right) \quad (1)$$

式中: ϕ_D 为等效内摩擦角; ϕ 为土体内摩擦角; c 为土体黏聚力; γ 为土体重度; h 为土层厚度。

(3) 采用加权平均法对多层土体单一化处理:

$$\gamma_D = \frac{\sum_{i=1}^n \gamma_i h_i}{\sum_{i=1}^n h_i} \quad (2)$$

式中: γ_D 为等效重度; γ_i 为第 i 层土的重度; h_i 为第 i 层土的厚度; n 为土层数。

4 空间效应简化计算方法推导

4.1 拉裂-剪切复合破坏型

根据 Mohr-Coulomb 准则,将黏性土等效为无黏性土后,土体的屈服函数为: $F = \tau - \sigma \tan \phi_D$ 。假定土体服从相关联流动法则,则整个破裂体的滑动速度场如图 1(b)所示,与破裂面 $E'CDF'$ 的滑动切线 $E'E$ (或 $F'F$) 的夹角为 ϕ_D 。又端部破裂面 ACE' 和 $B'DF'$ 的滑动切线分别为 $E'C$ 和 $F'D$,于是破裂体在端部的滑动速度也必与 $E'C$ 和 $F'D$ 成 ϕ_D 角。根据滑动速度连续和相容条件,则 $E'C$ 与 $E'E$ 间的夹角为 ϕ_D , $F'D$ 与 $F'F$ 间的夹角也为 ϕ_D ,于是可采用塑性极限理论来进行分析。

(1) 确定总主动土压力上限值 E_a^+ 及破裂角 β_{cr}

如图 1 所示,破裂体的自重为

$$W = W_I - 2W_{II} + W_{III} \quad (3)$$

式中: $W_I = \gamma a B H_{cr} / 2$; $W_{II} = \gamma a q H_{cr} / 6$; $W_{III} = \gamma a B \cdot (H - H_{cr}) / 2$ 。将 $q = H_{cr} \tan \phi_D / \sin \beta$, $a = H_{cr} \cot \beta$, $H_{cr} = B \sin \beta / (2 \tan \phi_D)$ ^[18]代入式(3),并整理可得

$$W = \frac{1}{12} \gamma B^2 \frac{\cos \beta}{\tan \phi_D} \left(3H - \frac{B \sin \beta}{2 \tan \phi_D} \right) \quad (4)$$

相应破裂体自重产生的外力功率为

$$\dot{W}_{外} = W V \sin(\beta - \phi_D) \quad (5)$$

即

$$\dot{W}_{外} = \frac{1}{12} \gamma B^2 V \sin(\beta - \phi_D) \frac{\cos \beta}{\tan \phi_D} \left(3H - \frac{B \sin \beta}{2 \tan \phi_D} \right) \quad (6)$$

由于将土体等效为无黏性土, 即不考虑土体抗拉能力的内能耗散, 仅考虑围护桩对破裂体的推力所产生的能量耗散。如图3所示, 设围护桩与土体间的内摩擦角为 δ (经验取 15° [17]), 则围护桩对三维破裂土体的推力 E_a 所产生的消散功率为

$$\dot{W}_{E_a} = E_a V \cos(\beta - \phi_D - \delta) \quad (7)$$

根据虚功率原理 $\dot{W}_{E_a} = \dot{W}_{\text{外}}$, 可得

$$E_a = \frac{1}{12} \gamma B^2 \sin(\beta - \phi_D) \left(3H - \frac{B \sin \beta}{2 \tan \phi_D} \right) \cdot \frac{\cos \beta}{\tan \phi_D \cos(\beta - \phi_D - \delta)} \quad (8)$$

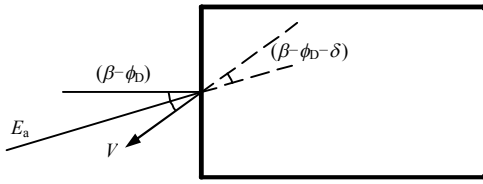


图3 支护结构的推力产生的消散功率

Fig.3 Dissipation power rate produced by supporting structure

显然, 对于某一特定工程而言, E_a 仅是破裂角 β 的函数, 将不同的 β 值 (通常应在 $45^\circ + \phi_D/2$ 左右选取) 代入式(8)进行迭代计算, 得到 $E_{a \max}$ 所对应的 β 值称为基坑坑壁全长三维破裂土体的临界破裂角 β_{cr} , 于是, 基坑坑壁拉裂—剪切型三维破裂土体作用在基坑坑壁上的主动土压力的上限值 E_a^\perp 为

$$E_a^\perp = \frac{1}{12} \gamma B^2 \sin(\beta_{cr} - \phi_D) \left(3H - \frac{B \sin \beta_{cr}}{2 \tan \phi_D} \right) \cdot \frac{\cos \beta_{cr}}{\tan \phi_D \cos(\beta_{cr} - \phi_D - \delta)} \quad (9)$$

(2) 计算空间状态下任一位置主动土压力 P_{ax}

单位长度滑动破裂体的土压力分布如图4所示, 利用正弦定理可推出单位长度作用在支护结构上的主动土压力为

$$P_a = \gamma H_{cr} \frac{\left(H - \frac{H_{cr}}{2} \right) \sin(\alpha - \phi_D) \cot \alpha}{\cos(\alpha - \phi_D - \delta)} \quad (10)$$

如图5所示, 对任意水平距离 x 截面处有

$$\frac{y}{a} = \frac{x}{B/2} \quad (11)$$

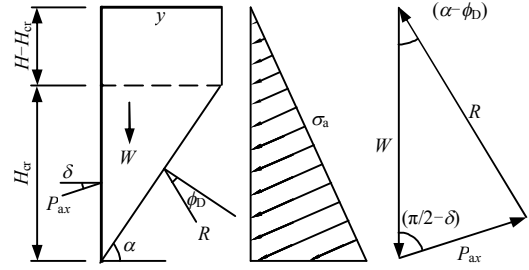


图4 拉裂-剪切破坏模式的极限平衡分析图式

Fig.4 Limit equilibrium analysis schema of tension crack-shear failure mode

将 $a = H_{cr} \cot \beta_{cr}$ 代入式(11)并整理可得

$$y = \frac{2x H_{cr} \cot \beta_{cr}}{B} \quad (12)$$

由图4可知, $\cot \alpha$ 的表达式为

$$\cot \alpha = \frac{y}{H_{cr}} = \frac{2x \cot \beta_{cr}}{B} \quad (13)$$

将式(13)代入式(10)中整理可得

$$P_{ax} = \gamma x \frac{\cos \beta_{cr}}{\tan \phi_D} \left(H - \frac{B \sin \beta_{cr}}{4 \tan \phi_D} \right) \cdot \frac{B \cos \phi_D - 2x \cot \beta_{cr} \sin \phi_D}{2x \cot \beta_{cr} \cos(\delta + \phi_D) + B \sin(\delta + \phi_D)} \quad (14)$$

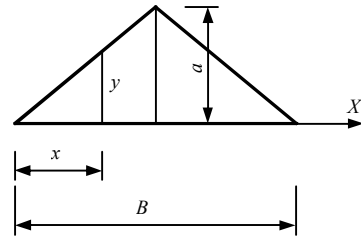


图5 基坑顶面的破裂土体边界线

Fig.5 Boundary line of failure soil mass on the top surface of deep pit

(3) 平面状态下主动土压力上限值的 $P_{a \perp}^\perp$ 的计算

对于平面状态下作用在支护结构上的主动土压力 $P_{a \perp}^\perp$ 可取单位长度进行计算, 则

$$P_{a \perp}^\perp = \frac{\gamma B \cos \theta_{cr} \left(H - \frac{B \sin \theta_{cr}}{4 \tan \phi_D} \right) \sin(\theta_{cr} - \phi_D)}{\cos(\theta_{cr} - \phi_D - \delta)} \quad (15)$$

式中: θ_{cr} 为二维状态下的临界破裂角, 可由式(16)通过试算求出。将不同的 θ 值代入式(16)中, 其中与最大值相对应的 θ 值即为临界破裂角 θ_{cr} 。式(16)的表达式为

$$P_{a\text{平}} = \frac{\gamma B \cos \theta \left(H - \frac{B \sin \theta}{4 \tan \phi_D} \right) \sin(\theta - \phi_D)}{\cos(\theta - \phi_D - \delta)} \quad (16)$$

(4) 空间效应系数 K 的计算

$$K = x \frac{\frac{\cos \beta_{cr}}{\tan \phi_D} \left(H - \frac{B \sin \beta_{cr}}{4 \tan \phi_D} \right) \frac{B \cos \phi_D - 2x \cot \beta_{cr} \sin \phi_D}{2x \cot \beta_{cr} \cos(\delta + \phi_D) + B \sin(\delta + \phi_D)}}{\frac{B \cos \theta_{cr}}{2 \tan \phi_D} \left(H - \frac{B \sin \theta_{cr}}{4 \tan \phi_D} \right) \sin(\theta_{cr} - \phi_D) \cos(\theta_{cr} - \delta - \phi_D)}, \quad (0 \leq x \leq B/2) \quad (17)$$

将各物理参数代入式 (17), 就可得到长大深基坑空间效应系数的分布情况。

4.2 坑壁土体的纯剪破坏型

对于坑壁土体的纯剪破坏型, 文献[17]已推导出无黏性土条件下基坑施工空间效应系数的计算公式, 因此, 对于黏性土只需将摩擦角 ϕ 替换为等代内摩擦角 ϕ_D 即可, 其具体计算公式为

$$E_a = \gamma H^2 \frac{\sin(\beta - \phi_D) \cot \beta \left(\frac{B}{2} - \frac{H \tan \phi_D}{3 \sin \beta} \right)}{\cos(\beta - \phi_D - \delta)} \quad (18)$$

$$P_{a\text{平}} = \frac{1}{2} \gamma H^2 \frac{\sin(\theta - \phi_D) \cot \theta}{\cos(\theta - \phi_D - \delta)} \quad (19)$$

$$K = \left. \begin{aligned} & \frac{x \cos \beta_{cr} \left(1 - \frac{x}{H} \cos \beta_{cr} \right) \cos \phi_D}{\frac{H \sin(\delta + \phi_D) \tan \phi_D + x \cos(\delta + \phi_D) \cos \beta_{cr}}{\cot \theta_{cr} \sin(\theta_{cr} - \phi_D)} \frac{\cos(\theta_{cr} - \delta - \phi_D)}{\cos(\theta_{cr} - \delta - \phi_D)}}, \\ & \left(0 \leq x \leq H \frac{\tan \phi_D}{\sin \beta_{cr}} \right) \\ & \frac{\cot \beta_{cr} \sin(\beta_{cr} - \phi_D)}{\frac{\cos(\beta_{cr} - \delta - \phi_D)}{\cot \theta_{cr} \sin(\theta_{cr} - \phi_D)} \frac{\cos(\theta_{cr} - \delta - \phi_D)}{\cos(\theta_{cr} - \delta - \phi_D)}}, \left(H \frac{\tan \phi_D}{\sin \beta_{cr}} \leq x \leq \frac{B}{2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

表 1 物理力学参数取值表^[20]

Table 1 Physical and mechanical parameters^[20]

土层名称	厚度 h/m	重度 $\gamma/(kN/m^3)$	黏聚力 c/kPa	摩擦角 $\phi/^\circ$	等代内摩擦角 $\phi_D/^\circ$	重度 $\gamma_D/(kN/m^3)$
淤泥	11.48	15.57	14.0	1.0		
粉沙	2.50	18.70	37.0	6.1	17.85	17.94
粉质黏土	5.84	21.00	21.0	7.2		
弱风化砂岩	4.18	21.00	30.0	40		

5 算例分析

以武广客运专线上的金沙洲隧道明挖段基坑

若定义空间状态时坑壁支护结构某一截面上的主动土压力值 P_{ax} 与平面状态下单位长度支护结构上的主动土压力值 $P_{a\text{平}}^{\perp}$ 的比值 K 为其空间效应的影响系数, 则有式 (17)。

为实例, 分别针对 2 种开挖情况进行算例分析, 得出其空间效应分布特征。各计算参数和模型图如表 1 及图 6 和图 7 所示。

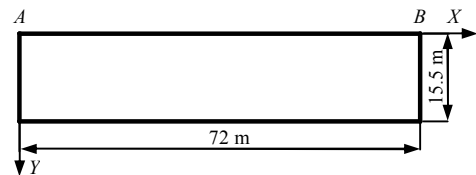


图 6 算例 1 基坑平面尺寸图

Fig.6 Plane size of deep pit of example 1

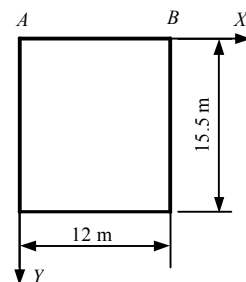


图 7 算例 2 基坑平面尺寸图

Fig.7 Plane size of deep pit of example 2

算例 1. 取基坑开挖深度为 22.22 m, 长度为 72 m, 宽度为 15.5 m, 开挖矩形边界如图 6 所示。

(1) 计算土体破裂角 β_{cr}

不妨假定该条件下基坑坑壁土体破坏为纯剪型破坏, 将各相关数据代入到式 (18), 求得 $\beta_{cr} = 49.1^\circ$ 。

(2) 破坏模式检验

将已得到的 $\beta_{cr} = 49.1^\circ$ 代入判定条件, 可得

$$\frac{H}{B} = \frac{22.22}{72} = 0.308 < \frac{\sin \beta_{cr}}{2 \tan \phi_D} = \frac{\sin 49.1^\circ}{2 \tan 17.85^\circ} = 1.17,$$

可见本条件下基坑坑壁土体的破坏模式为纯剪型三维破坏。

(3) 平面状态下破裂角 θ_{cr} 的计算

将各数据代入式 (19), 计算得到 $\theta_{cr} = 48^\circ$ 。

(4) 空间效应系数 K 的计算

将以上得到的 β_{cr} 、 θ_{cr} 及已知数据代入式(20), 便有该基坑 AB 边土压力空间效应系数分布表达式(21), 其分布曲线见图8。

$$K = \begin{cases} \frac{x - 0.029x^2}{2.909 + 0.413x}, & (0 \leq x \leq 9.47) \\ 1.00, & (9.47 \leq x \leq 36) \end{cases} \quad (21)$$

从图8可见, 相对较长的基坑, 其空间效应对坑壁中间区域的整体屏蔽作用很弱, 因此, 计算时可将其视为二维平面问题进行。同时, 空间效应主要影响范围为基坑两端部分, 约 1/4 基坑长度, 且越靠近端部, 空间效应越明显, 实际设计过程中可将端部支护适当减弱, 以节省工程投资。

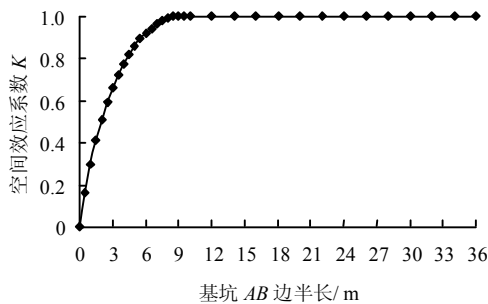


图8 算例1空间效应系数沿基坑长度分布示意图(取半)
Fig.8 Distribution of spatial effect coefficient along the length of deep pit of example 1(half)

算例2. 取基坑开挖深度为 22.22 m, 长度为 12 m, 宽度为 15.5 m, 开挖矩形边界如图7所示。

(1) 计算土体破裂角 β_{cr}

不妨假定该条件下, 基坑坑壁土体破坏为纯剪型破坏, 则将各相关数据代入到式(18), 求得 $\beta_{cr} = 57.8^\circ$ 。

(2) 破坏模式检验

将已得到的 $\beta_{cr} = 57.8^\circ$ 代入判定条件, 可得

$$\frac{H}{B} = \frac{22.22}{12} = 1.85 > \frac{\sin \beta_{cr}}{2 \tan \phi_0} = \frac{\sin 57.8^\circ}{2 \tan 17.85^\circ} = 1.31, \text{ 可}$$

见本条件下基坑坑壁土体的破坏模式并非纯剪型三维破坏, 而属于拉裂—剪切型三维破坏。将数据重新代入式(8), 求得 $\beta_{cr} = 52.2^\circ$ 。

(3) 平面状态下破裂角 θ_{cr} 的计算

将各数据代入式(16), 计算得到: $\theta_{cr} = 54.3^\circ$ 。

(4) 空间效应系数 K 的计算

将以上计算得到的 β_{cr} 、 θ_{cr} 及已知数据代入式(17), 便有该基坑 AB 边土压力空间效应系数分布表达式(22), 其分布曲线图见图9。

$$K = \frac{3.170x - 0.132x^2}{8.485 + 1.303x}, \quad (0 \leq x \leq 6) \quad (22)$$

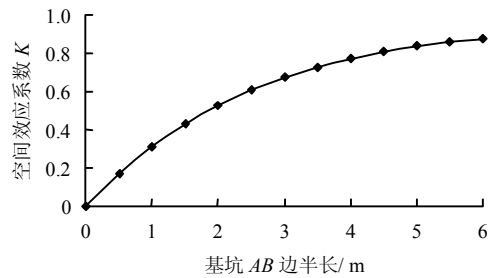


图9 算例2空间效应系数沿基坑长度分布示意图(取半)
Fig.9 Distribution of spatial effect coefficient along the length of deep pit of example 2 (half)

由图9可见, 当基坑开挖边长较短时, 其空间效应对坑壁中间区域的整体屏蔽作用明显, 中心处空间效应系数为 0.87, 可见考虑空间效应时, 其土压力将比平面计算减小约 13%, 实际设计过程中可适当减弱支护结构强度。

6 结论及建议

(1) 长大深基坑的施工存在显著的空间效应, 开挖边长较长时, 仅在端部一定范围内存在空间效应, 而中间部分可视为平面问题进行分析。开挖边长较短, 空间效应明显, 从端部呈抛物线形式向中间递减。设计、施工时, 应尽量选取较短的开挖边长, 从而充分利用空间效应, 两端部位适当减弱支护强度, 节省工程造价。

(2) 监测测点或断面选取时, 应重点放在基坑开挖边的中间位置, 从而达到最及时地了解基坑稳定性情况。

通过上述分析可知, 本文推导的长大深基坑施工空间效应简化计算方法避免了数值计算的低效率、高费用, 可手算完成, 不仅可作为设计、施工参考, 对信息化监测具有重要的指导意义。

7 结 语

对长大深基坑施工空间效应的研究目前大多采用数值模拟的方法进行, 理论分析尚不多见。笔者在前人研究的基础上做了一定的探讨工作, 但在以下几个方面还需要深入地研究: (1) 基坑土体破坏模式进行了一定的简化, 采用了平面破裂面代替曲面破裂面; (2) 将黏性土等代为无黏性土, 推导过程中没有考虑土体的抗拉能力对能量的耗散; (3) 采用了相关联流动法则, 无法考虑破裂体内部的能量耗散, 使得计算结果有所保守。

如何准确描述基坑土体破坏模式,建立更精确的滑动速度场,充分考虑土体黏聚力及破裂体内部能量耗散应为后续研究工作的重点。

参考文献

- [1] 周沛. 地下连续墙在深基坑支护中的应用[J]. 工程设计与建设, 2006, 37(3): 22—26.
ZHOU Pei. Application of underground diaphragm wall in deep foundation pit support[J]. **Engineering Design and Construction**, 2006, 37(3): 22—26.
- [2] 肖宏彬, 王永和, 王星华. 多支撑挡土结构考虑开挖过程的有限元分析方法[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 47—51.
XIAO Hong-bin, WANG Yong-he, WANG Xing-hua. Finite element analysis of multi-braced retaining structures with consideration of the effect of staged excavation[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(1): 47—51.
- [3] 王生力, 韩振富, 刘唐生, 等. 基坑开挖围护设计实例分析及问题探讨[J]. 工程勘察, 2003, (4): 35—37.
WANG Sheng-li, HAN Zhen-fu, LIU Tang-sheng, et al. Case study of supporting structure design in foundation pit and its problems discussion[J]. **Geotechnical Investigation & Surveying**, 2003, (4): 35—37.
- [4] 李萍, 邓小鹏, 相建华, 等. 基坑开挖与支护模拟的位移迭代法[J]. 岩土力学, 2005, 26(11): 1815—1818.
LI Ping, DENG Xiao-peng, XIANG Jian-hua, et al. Method of displacement iteration in numerical simulation of foundation pit[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(11): 1815—1818.
- [5] 肖武权, 冷伍明, 律文田. 某深基坑支护结构内力与变形研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(8): 1271—1274.
XIAO Wu-quan, LENG Wu-ming, LÜ Wen-tian. Study on inner force and deformation of supporting structure for deep foundation pit[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(8): 1271—1274.
- [6] 张丙强. 内撑式支护软土基坑有限元分析[J]. 岩土工程界, 2007, 9(3): 49—51.
ZHANG Bing-qiang. Finite element analysis of support within the shoring-soft soil excavation[J]. **Geotechnical Engineering World**, 2007, 9(3): 49—51.
- [7] 陈书申. 软土深基坑的开挖顺序、荷载分布与内支撑设计[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2003, 42(1): 52—55.
CHEN Shu-shen. Excavating sequence, load distribution and inner brace design in the soft soil foundation pit[J]. **Journal of Xiamen University(Natural Science)**, 2003, 42(1): 52—55.
- [8] 陈灿寿, 张尚根, 余有山. 深基坑支护结构变形计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(12): 2065—2068.
CHEN Can-shou, ZHANG Shang-gen, YU You-shan. Prediction of retaining structure displacement in foundation pit[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(12): 2065—2068.
- [9] 杨光华. 深基坑支护结构的实用计算方法及其应用[J]. 岩土力学, 2004, 25(12): 1885—1902.
YANG Guang-hua. Practical calculation method of retaining structures for deep excavations and its application[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(12): 1885—1902.
- [10] 刘红军, 董淑云. 深基坑支护结构设计的平面应变有限元法[J]. 青岛海洋大学学报, 2003, 33(4): 581—586.
LIU Hong-jun, DONG Shu-yun. The plane strain finite element method in the design of supporting structure in deep foundation pits[J]. **Journal of Ocean University of Qingdao**, 2003, 33(4): 581—586.
- [11] 沈健, 王建华, 高绍武. 基于“m”法的深基坑支护结构三维分析方法[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(4): 531—533.
SHEN Jian, WANG Jian-hua, GAO Shao-wu. 3-D analysis method of retaining structure of deep excavation based on “m” method[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2005, 1(4): 531—533.
- [12] 高文华, 杨林德. 软土深基坑围护结构变形的三维有限元分析[J]. 工程力学, 2000, 17(2): 134—141.
GAO Wen-hua, YANG Lin-de. Three-dimensional finite element analysis of deformation of the retaining structure of deep foundation pit in soft-clay[J]. **Engineering Mechanics**, 2000, 17(2): 134—141.
- [13] 陆培毅, 李绍忠, 顾晓鲁. 基坑支护结构的空间分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(1): 121—124.
LU Pei-yi, LI Shao-zhong, GU Xiao-lu. Space analysis of retaining structures for foundation pits[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(1): 121—124.
- [14] 赖冠宙, 房营光, 史宏彦. 深基坑排桩支护结构空间共同变形分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(8): 1749—1752.
LAI Guan-zhou, FANG Ying-guang, SHI Hong-yan. Spatial mutual deformation analysis method for row of piles of deep excavation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(8): 1749—1752.
- [15] 俞建霖, 龚晓南. 深基坑工程的空间性状分析[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(1): 21—25.
YU Jian-lin, GONG Xiao-nan. Spatial behavior analysis of deep excavation[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1999, 21(1): 21—25.

- [16] 吴志敏, 屠毓敏. 土钉基坑支护的空间效应研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(10): 2178—2182
WU Zhi-min, TU Yu-min. Space effect of soil-nailing excavation protection[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(10): 2178—2182.
- [17] 杨雪强, 刘祖德, 何世秀. 论深基坑支护的空间效应[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(2): 74—78.
YANG Xue-qiang, LIU Zu-de, HE Shi-xiu. Research about spatial effect of deep pit supporting[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1998, 20(2): 74—78.
- [18] 杨雪强, 何世秀, 余天庆. 加筋砂土作用在挡土墙上的土压力研究[J]. 岩土力学, 1997, 18(1): 25—34.
YANG Xue-qiang, HE Shi-xiu, YU Tian-qing. Research about the pressure of reinforced cohesion less backfill acted on the retaining wall[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1997, 18(1): 25—34.
- [19] 刘建航, 侯学渊, 刘国彬, 等. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [20] 铁道部第四勘察设计院. 新广州站及相关工程金沙洲隧道补充定测工程地质勘察报告[R]. 武汉: 铁道部第四勘察设计院, 2006.
- [21] 雷明锋. 客运专线隧道浅埋段长大深基坑支护优化与空间效应研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008.