

方形竖井空间主动土压力演化规律研究

徐伟¹, 李楠楠², 张亚鹏^{1,3}, 朱谭谭², 邬志¹, 盛可鑫²

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司; 2. 长安大学公路学院; 3. 绿色矿山技术与智能装备浙江省工程研究中心)

摘要:为研究方形竖井井壁空间主动土压力的分布规律,建立了不同宽高比影响下方形竖井周围土体的滑动体破坏模型,推导得到了空间主动土压力计算公式,分析了挡土墙和周围土体物理力学参数对空间主动土压力的影响。研究表明:方形竖井挡土墙宽高比较小时,滑动体上部为三棱柱、下部为楔形体;宽高比较大时,滑动体为楔形体,楔形体横截面为梯形;随着宽高比的增大,相同埋深处的空间主动土压力逐渐增大,并随着埋深的增大逐渐由非线性变化趋向于稳定,其大小趋向于库仑土压力;挡土墙临界宽高比随挡土墙宽高比的增大逐渐增大,随土体内摩擦角的增大逐渐减小;宽高比小于 10 时,空间主动土压力与库仑土压力差异较大,宽高比大于 10 时,空间主动土压力与库仑土压力差异小于 10%。

关键词:方形竖井;主动土压力;滑动体;宽高比;空间效应

Study on evolution law of spatial active earth pressure for square shaft//Xu Wei¹, Li Nannan², Zhang Yapeng^{1,3}, Zhu Tantan², Wu Zhi¹, Sheng Kexin² (1. POWERCHINA Huadong Engineering Corporation Limited; 2. School of Highway, Chang' an University; 3. Zhejiang Engineering Research Center of Green Mine Technology and Intelligent Equipment)

Abstract: To investigate the distribution of spatial active earth pressure on the walls of square shafts, a failure model of the sliding body in surrounding soil under different aspect ratios was established. A formula for calculating the spatial active earth pressure was derived, and the influence of physical and mechanical parameters of the retaining wall and surrounding soil on the spatial active earth pressure was analyzed. The results show that when the aspect ratio of the square shaft wall is small, the sliding body consists of an upper triangular prism and a lower wedge. When the aspect ratio is large, the sliding body is a single wedge with a trapezoidal cross-section. As the aspect ratio increases, the spatial active earth pressure at the same burial depth gradually increases. With the increase of burial depth, the earth pressure gradually transitions from a nonlinear variation to a stable state, approaching the Coulomb's earth pressure. The critical aspect ratio of the retaining wall increases with the increase of the wall's aspect ratio and decreases with the increase of the soil's internal friction angle. When the aspect ratio of the retaining wall is less than 10, the difference between the spatial active earth pressure and Coulomb's earth pressure is significant. When the aspect ratio exceeds 10, the difference is less than 10%.

Key words: square shaft; active earth pressure; sliding body; aspect ratio; spatial effect

随着城市建设的快速推进和城市基础设施的全面改造,城市地下空间的开发利用已成为推动城市可持续发展的重要路径。地下工程施工中,竖井(深基坑)作为地下空间与外界联系的关键通道,其安全性和稳定性至关重要。竖井施工过程中,井壁的设计合理性直接关系到竖井的整体安全,而井壁结构设计中的核心内容与其所承受的土压力大小及分布有关,因此研究竖井井壁的土压力分布具有重要意义。

目前,土压力分布的计算方法已积累了大量研究成果,主要包括模型试验、理论解析与数值模拟等方向^[1-5]。刘忠玉^[6]基于墙体在极限平衡状态下滑动面通过墙角的假定,提出了非线性主动土压力分布的理论公式。Niedostatkiewicz 等^[7-8]应用粒子图像测速技术,对无黏性土挡土墙剪切区及主动土压力分布进行了试验研究。应宏伟等^[9]通过有限元分析,分别推导了砂土与黏性土主动土压力分布及合力作用点相对高度的计算公式。Jaradat 等^[10-11]则采用离散元方法对土压力开展了多尺度数值分析。上述研究均将土压力问题简化为平面问题,得

基金项目:国家自然科学基金项目(42307222);黄土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室开放基金项目(KLTR-Y23-3)
作者简介:徐伟(1975—),男,高级工程师,硕士,主要从事水利水电工程研究。E-mail:1016515446@qq.com
通信作者:朱谭谭(1989—),男,副教授,博士,主要从事隧道及地下工程研究。E-mail:tantan.zhu@foxmail.com

到的结果较保守。经典的朗肯土压力理论和库仑土压力理论均将挡土墙视为平面问题进行研究,即将挡土墙视为无限长墙中的一个单位长度墙体,土压力随深度呈线性分布。然而实际工程中,挡土墙的长度是有限的,作用在挡土墙上的土压力与墙长和墙高均有关。将土压力问题简化为平面问题不能真正反映墙后填土的破坏特征,甚至与工程实际差异较大。为此,部分学者转向空间土压力研究,但仍存在明显局限。关晓迪等^[12]建立了考虑中主应力系数的圆形竖井主动土压力计算模型,Cheng 等^[13-14]的研究表明圆形竖井土压力随深度呈非线性增长,但圆形竖井的主动土压力模型及土压力分布规律难以推广至方形截面。朱正国等^[15-18]采用有限差分法分析了方形竖井土压力与周围土体的变形规律,发现土体破坏模式随长宽比而变化。Yang 等^[19-21]基于极限平衡法揭示了宽高比的影响机制,但没有提出实用算法。因此,现有主动土压力研究在从平面问题转向空间问题时,所提出的理论模型多局限于圆形竖井,而针对方形竖井还没有公认的实用计算方法。因此,对方形竖井空间主动土压力分布与计算方法的研究仍显不足。

本文基于三维极限平衡理论,以方形竖井挡土墙为研究对象,通过构建由宽高比控制的滑动体破坏模型,提出了空间主动土压力计算方法并分析了其分布规律,可为软土地层中方型竖井工程的支护设计提供参考。

1 土体破坏模式

针对方形竖井挡土墙,Yang 等^[19-20]指出,挡土墙后填土的滑动体形状并非简单的平面三角形分布,而是与墙的宽度和高度均有关。而 Soubra 等^[22]研究表明,挡土墙后滑动体的形状根据挡土墙宽高比 n 可分为三棱柱+楔形体、楔形体两种,两种破坏形状间存在一种临界状态,即当滑动体的破坏形状恰好是高度为 H_{cr} 的单一楔形体时,所对应的挡土

墙宽高比即为临界宽高比 n_{cr} 。传统平面土压力理论难以反映其真实的空间受力状态。研究表明,墙后滑动体的三维形态及土压力分布受控于挡土墙的宽高比。如图 1 所示(图中 H 为挡土墙高度; B 为挡土墙宽度; T_1 为三棱柱高度; T_2 为土体切除部分的高度; θ 为破坏角,即滑动体中轴线处滑动面与挡土墙间的夹角),当 $n < n_{cr}$ 、 $n = n_{cr}$ 、 $n > n_{cr}$ 时,滑动体分别呈现为“上部三棱柱+下部楔形体”的组合物、完整的三角形顶面楔形体、梯形顶面楔形体 3 种形状。该空间形态的差异,是影响方形竖井土压力分布区别于经典平面解的关键因素,也构成了本文研究的理论基础。

为了计算方形竖井挡土墙上的土压力,需要确定滑动体的范围。在外力作用下,竖井周围土体内会形成一系列拱形结构,这些拱形结构能抵抗外力的作用,从而保持土体的稳定性。随着变形的增大,土体中的拱作用逐渐明显,当达到极限平衡状态时形成极限平衡拱。顾慰慈^[23]取墙宽的一半作为研究对象,建立了任意深度处的平衡拱进行分析,得到了极限平衡拱计算公式:

$$x^2 - B\tan\varphi = 0 \tag{1}$$

式中: x 、 y 分别为平衡拱在水平与竖直方向的坐标(以拱顶或墙中心为原点); φ 为墙后土体内摩擦角。

为了简化计算,对挡土墙及墙后土体作如下假设:①挡土墙为竖直、刚性体,墙后填土面水平,墙后填土可看作半无限空间,土体为均匀、各向同性材料;②达到主动极限平衡状态时,破裂面通过墙脚;③墙体与填土间的摩擦角为恒定值;④忽略挡土墙的转动。

当支护结构与土体的弹性模量比大于 1 000 且井壁挡土墙在短期开挖荷载下的变形量低于变形阈值 0.05% H 时,视其为刚性体。

如图 1(b)所示,当 $n = n_{cr}$ 时,竖直三棱柱高度为 0,设此时挡土墙高度为 H_{cr} ,则临界宽高比为:

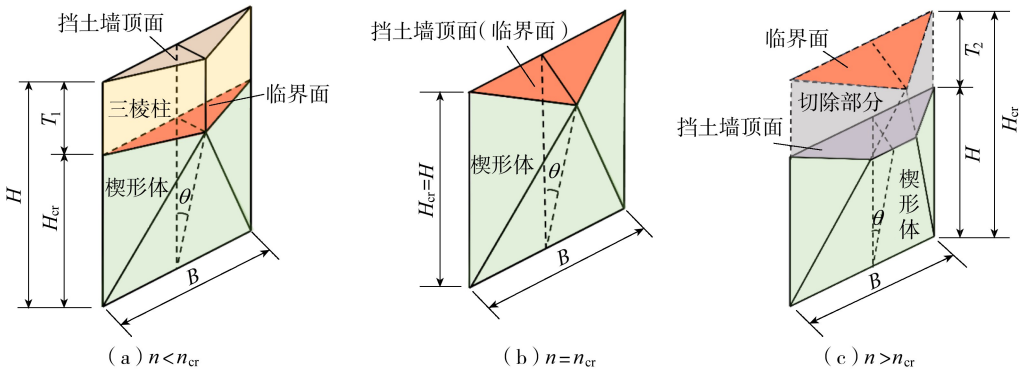


图 1 滑动体破坏形状

$$n_{cr} = B/H_{cr} \quad (2)$$

因此求得 H_{cr} 即可确定临界宽高比 n_{cr} 。为求得临界宽高比,需先求得滑动体体积。

当 $n \leq n_{cr}$ 时,滑动体由高度为 T_1 的三棱柱和高度为 $H-T_1$ 的楔形体两部分组成,滑动体总体积为:

$$V_1 = BhH/2 - Bh(H-T_1)/4 \quad (3)$$

为简化计算,可将滑动体横截面进行简化,即平衡拱用面积相等的等效三角形来代替,该三角形即为图 1(a) 所示三棱柱横截面三角形。根据平衡拱面积和等效三角形面积公式,可得三角形的高 h 为:

$$h = \frac{1}{3} B \cot \varphi \quad (4)$$

当 $n > n_{cr}$ 时,滑动体为顶面是梯形的楔形体,楔形体顶面梯形高度为 h_0 ,则楔形滑动体总体积为:

$$V_2 = Bh_0^2 H/2h + B(h-h_0)h_0 H/4h \quad (5)$$

其中 $h_0 = Hh/(H+T_2)$

因墙后滑动体关于挡土墙中轴线对称,所以墙后主动土压力的合力、滑动体的重力、滑动体作用在滑动面上的反力等力的作用点均在挡土墙中线上。 $n \leq n_{cr}$ 和 $n > n_{cr}$ 两种情况下滑动体受力状态分别如图 2(a)(b) 所示。滑动体重力 $G = \gamma V$ (γ 为土体容重, V 为滑动体体积)。土体作用在挡土墙上的土压力的合力为 E , 其与墙面法线方向的夹角为 δ 。滑动体作用在底滑动面 ab 上的反力为 R , 其与底滑动面法线方向的夹角为 φ 。由滑动土体极限平衡状态下的静力平衡条件可得各作用力之间关系如图 2(c) 所示。根据三角形正弦定理可得主动土压力合力:

$$E = G \frac{\cos(\theta + \varphi)}{\sin(\delta + \theta + \varphi)} = \gamma V \frac{(\cot \varphi - \tan \theta) \sin \varphi}{[\tan \theta + \tan(\varphi + \delta)] \cos(\varphi + \delta)} \quad (6)$$

由式(6)可以看出,主动土压力合力 E 是 θ 的单值函数,当 $\theta=0$ 时, $G=0$, 当 $\theta=\pi/2 - \varphi$ 时, $E=0$ 。因此当 θ 在 $0 \sim \pi/2 - \varphi$ 范围内变化时, E 存在一个极大值,即所求的主动土压力。挡土墙宽度 B 为定

值时,等效三角形高度 h 为定值,所以 θ 是关于 H_{cr} 的函数,且由几何关系得:

$$\tan \theta = h/H_{cr} = h/(H-T_1) \quad (7)$$

当 $n \leq n_{cr}$ 时,将式(4)代入式(3),之后将式(3)和式(7)代入式(6),得主动土压力合力:

$$E = \frac{\gamma \left[\frac{BhH}{2} - \frac{BhH_{cr}}{4} \right] \left(\cot \varphi - \frac{h}{H_{cr}} \right) \sin \varphi}{\left[\frac{h}{H_{cr}} + \tan(\varphi + \delta) \right] \cos(\varphi + \delta)} \quad (8)$$

为了求解破坏角 θ , 令 $dE/dH_{cr} = 0$, 可得:

$$H_{cr} = B_2 + \frac{1}{2} \sqrt{B_2^2 + 4B_1} \quad (9)$$

其中 $B_1 = \frac{h + 2hH[\cot \varphi + \tan(\varphi + \delta)]}{\cot \varphi \tan(\varphi + \delta)}$

$$B_2 = 2h/\tan(\varphi + \delta)$$

当 $n > n_{cr}$ 时,将式(5)代入式(6),可得主动土压力合力:

$$E = \gamma \frac{(\cot \varphi - \tan \theta) \sin \varphi}{[\tan \theta + \tan(\varphi + \delta)] \cos(\varphi + \delta)} \cdot \left[\frac{Bh_0^2 H}{2h} + \frac{B(h-h_0)h_0 H}{4h} \right] \quad (10)$$

其中 $H = H_{cr} - T_2$

将式(9)代入式(2)可得临界宽高比:

$$n_{cr} = 2B/(2B_2 + \sqrt{B_2^2 + 4B_1}) \quad (11)$$

将式(4)和式(9)代入式(7)可得:

$$\tan \theta = (2B \cot \varphi)/3(2B_2 + \sqrt{B_2^2 + 4B_1}) \quad (12)$$

2 主动土压力分布

2.1 主动土压力沿墙深分布特征

在外荷载作用下,墙后填土绕墙脚滑动时,墙后填土内部存在多条相互平行的滑动面,其与水平方向夹角等于滑动面倾角^[24]。故假定任意高度处所对应的滑动面均平行于边缘滑动面,采用基于滑裂面分层得到的斜微分单元法分析土压力沿墙深的分布。假定某一底滑动面与挡土墙的交点埋深为 z , 该底滑动面、两侧滑动面、挡土墙围成的滑动体顶面

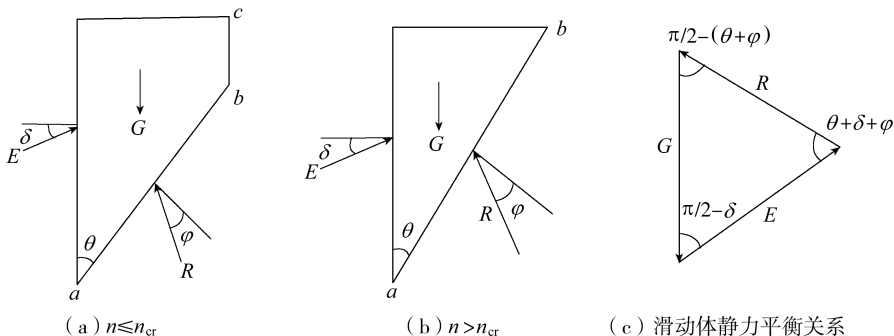


图2 滑动体受力分析

面积为 A_z 。

如图 3 所示,取某一埋深为 z 的底滑动面,该底滑动面与两侧滑动面及挡土墙围成一个空间滑动楔形体。根据受力平衡,作用于该微分单元上的总主动土压力微分 dE 可由滑动面上的极限抗力积分求得。

设 k 为土压力系数:

$$k = \frac{(\cot \varphi - \tan \theta) \sin \varphi}{[\tan \theta + \tan(\varphi + \delta)] \cos(\varphi + \delta)} \tag{13}$$

则任意埋深 z 处主动土压力 p 为:

$$p = dE/Bdz = k\gamma dV/Bdz = k\gamma A_z/B \tag{14}$$

当 $n \leq n_{cr}$ 时,如果 $z \leq H_{cr}$,则任意埋深 z 处对应的滑动体顶面面积 A_z 为:

$$A_z = Bh/2 - B(h - z\tan\theta)^2/2h \tag{15}$$

将式(15)代入式(14),可得:

$$p = \gamma kh/2 - \gamma k(h - z\tan\theta)^2/2h \tag{16}$$

式(16)表明,此时主动土压力随埋深增大呈抛物线型增大。

当 $n \leq n_{cr}$ 、 $z > H_{cr}$ 时,滑动体顶面将完全形成,其面积 A_z 达到最大值并保持不变,此时 $A_z = Bh/2$,将此面积代入式(14),得到此埋深区间的主动土压力为一常数:

$$p = \gamma kh/2 \tag{17}$$

当 $n > n_{cr}$ 时,任意埋深处对应的滑动体顶面面积 A_z 计算如图 3(b) 所示,任意埋深处挡土墙主动土压力同式(16)。

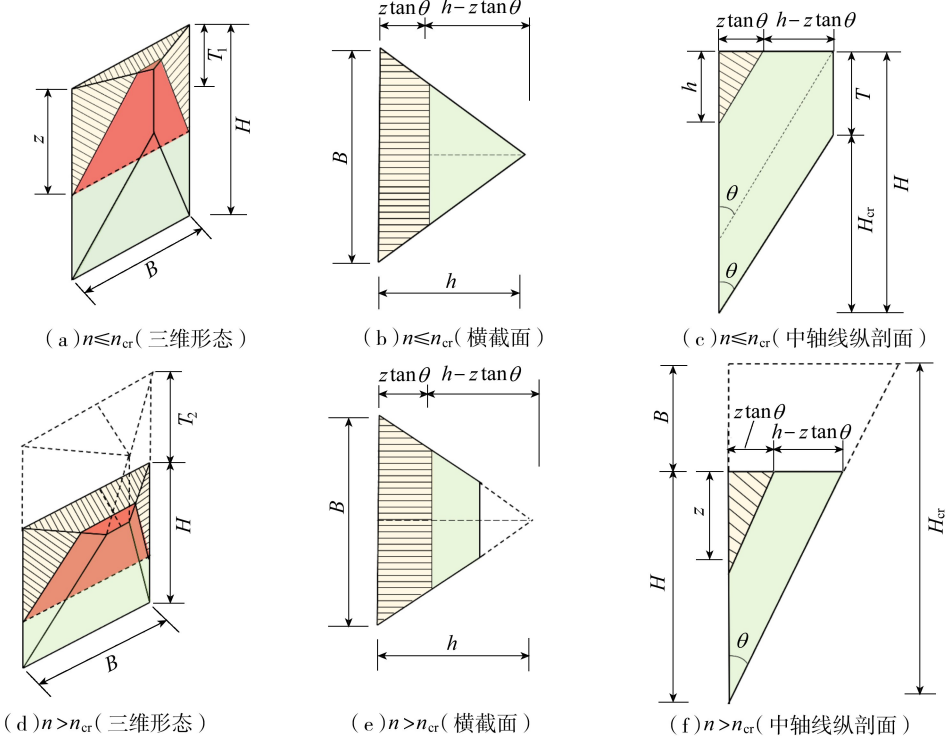


图 3 滑动体顶面面积计算示意图

2.2 主动土压力沿墙长分布特征

主动土压力沿墙长(墙宽)的分布规律,可由滑动体的三维几何形态推导得出。在任意埋深 z 处,作用于挡土墙上的主动土压力沿墙长的分布形式,与该埋深处滑动体水平横截面的几何形状直接相似。以挡土墙中轴线与地表的交点为坐标原点,计算模型的横截面和中轴线纵剖面如图 4 所示,任意埋深 z 处的主动土压力沿墙长的分布可用下式计算:

$$p = \gamma ky_0 \tag{18}$$

式中: y_0 为通过点(0,0, z)的滑动面与地面交线的 y 坐标。

当 $n \leq n_{cr}$ 时,如果 $z \leq H_{cr}$,滑动体水平截面呈梯形,故主动土压力沿墙长呈梯形分布,如图 4(a) 所示,主动土压力可以分 $|x| \leq x_0$ 和 $|x| > x_0$ 两部分计算,其中 x_0 为通过点(0,0, z)的滑动面与地面交线长度的一半。由相似三角形可以求得:

$$x_0 = B(h - 2y_0)/2h \tag{19}$$

当 $|x| \leq x_0$ 时,主动土压力可用下式计算:

$$p = \gamma ky_0 = \gamma kz \tan \theta \tag{20}$$

当 $|x| > x_0$ 时,任意埋深处滑动体横截面高度为

$$y = \frac{B - 2x}{B - 2x_0} z \tan \theta, \text{代入式(18)可得:}$$

$$p = \frac{B - 2x}{B - 2x_0} \gamma kz \tan \theta \tag{21}$$

当 $n \leq n_{cr}$ 、 $z > H_{cr}$ 时,滑动体横截面随埋深发生变化,主动土压力沿墙长的分布为可按式(20)

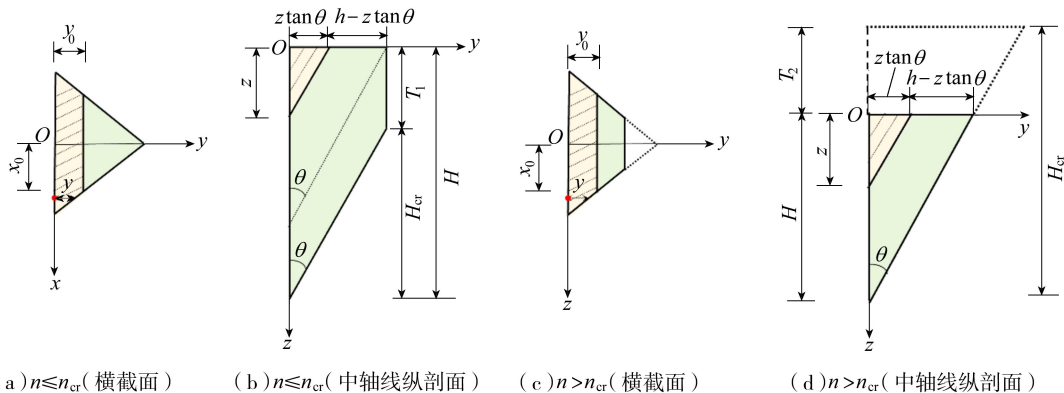


图4 土压力沿墙长分布计算示意图

计算。

当 $n > n_{cr}$ 时,任意埋深处主动土压力沿墙长的分布与 $n \leq n_{cr}$ 、 $z \leq H_{cr}$ 时相同,土压力分布分为两种情况,可分别按式(20)和式(21)进行计算。

2.3 主动土压力合力作用点位置

主动土压力合力作用点与墙顶的距离 H_E 可用下式计算:

$$H_E = \int p z dz / \int p dz = \int p z dz / E \quad (22)$$

当 $n \leq n_{cr}$ 时,将式(8)和(16)代入式(22),可得:

$$H_E = (6H^2 - h^2 \cot \theta) / (12H - 6h \cot \theta) \quad (23)$$

当 $n > n_{cr}$ 时,将式(10)和式(17)代入式(22),可得:

$$H_E = (32H^2 h - 3H^3 \tan \theta) / (48h^2 \cot \theta - 24Hh) \quad (24)$$

3 土压力影响因素分析与验证

合阳县城南排水建设工程3号竖井开挖深度为50 m。竖井所在地层主要为黄土,通过室内试验,得到竖井周围土体容重为 20.1 kN/m^3 ,内摩擦角为 32.8° ,黏聚力为 34.0 kPa 。竖井的土体弹性模量为 32.4 MPa ,而C25混凝土井壁配格栅钢架后的等效模量为 38 GPa ,模量比超过阈值(1000);同时现场监测显示井壁最大水平位移仅 3.53 mm (对应50 m井深的变形阈值为 25 mm),完全满足刚性假设要求。因此,以该方形竖井为工程背景,分析挡土墙和周围土体相关物理力学参数对主动土压力的影响。

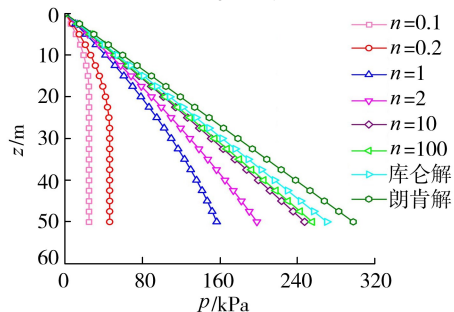
3.1 挡土墙宽高比

不同宽高比下,竖井单位井壁宽度上主动土压力 p 随埋深 z 的变化如图5(a)所示,可见井壁宽度会对井壁主动土压力产生较大影响。此外,墙-土摩擦角 δ 对竖井井壁主动土压力具有显著影响。在缺乏 δ 的确切值时,可以取 $\delta = \varphi/3^{[11]}$ 。因此,图5中 δ 取值为 10.9° 。主动土压力随埋深的增大逐渐增

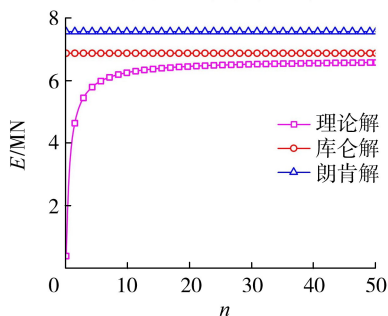
大,但增大速率逐渐减小。当宽高比较小时,埋深大于30 m后,主动土压力随埋深的增大基本保持不变。相同埋深下,主动土压力及其变化速率随宽高比的增大均逐渐增大。

竖井单位井壁宽度上主动土压力合力 E 随宽高比 n 的变化如图5(b)所示, E 随 n 增大而增大,增大速率逐渐减小, E 逐渐趋向于库仑主动土压力合力。由图5可知, E 始终小于主动土压力库仑解,随着 n 的增大, E 逐渐增大,趋向于平面应变条件下的库仑主动土压力。当 $n = 10, 100$ 时, E 理论解分别等于库仑主动土压力的93.1%和98.2%,即 $n > 10$ 时,随着 n 的增大,增加量逐渐减小,相对 n 的变化可以忽略不计。因此,当 $n < 10$ 时, E 与库仑主动土压力差异较大,此时采用库仑土压力理论求解偏于保守;当 $n > 10$ 时, E 与库仑主动土压力的差异小于10%,此时可采用库仑主动土压力理论近似求解。

不同土体内摩擦角 φ 下,临界宽高比 n_{cr} 随宽



(a) 土压力变化规律



(b) 单位井壁宽度上主动土压力合力

图5 宽高比对竖井井壁土压力的影响

高比 n 的变化如图 6 所示。 n_{cr} 随 n 的增大逐渐增大并趋向于一个阈值。以 $\varphi = 30^\circ$ 为例,当 $n = 0.2$ 时, $n_{cr} = 0.31$;当 $n = 5$ 时, $n_{cr} = 2.11$;随着 n 的继续增大, n_{cr} 逐渐趋向于 3.7。

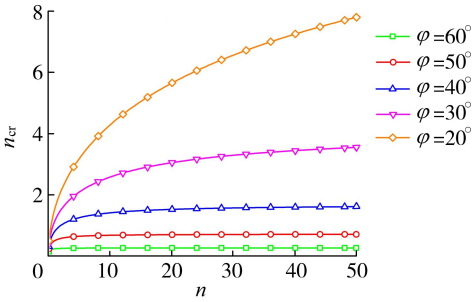


图 6 临界宽高比变化规律

3.2 土体内摩擦角和墙-土摩擦角

取井壁宽高比为 0.2,土体内摩擦角 φ 和墙-土摩擦角 δ 对单位井壁宽度上主动土压力合力 E 的影响如图 7 所示。相同 δ 下, E 随 φ 的增大逐渐减小。相同 φ 下, E 随 δ 的增大逐渐减小。 E 随 δ 的增大而逐渐减小可能是以下两方面原因导致的:①随着 δ 的增大,滑动体在井壁上的摩擦力增大,该摩擦力可以减小土体沉降和变形,减弱土体的破坏程度,进而减小作用在挡土墙上的主动土压力;② δ 增大时,土体与井壁间的摩擦力增大,土体内土拱效应增强,竖井周边土体承载能力增强,井壁上主动土压力减小。

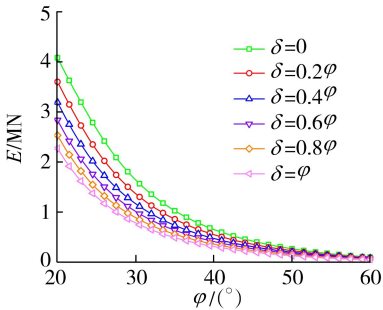


图 7 土体内摩擦角和墙-土摩擦角对土压力的影响

3.3 验证

为了验证上述理论解的有效性,本文采用颗粒流与有限差分(PFC-FLAC)耦合的方法来构建方形深竖井数值模型(图 8),即在模型中,根据土体距离井壁的远近,采取不同的模拟方法建模,对于距离井壁较远的土体,由于其变形和相对位移较小,采用有限差分法模拟;而对于距离井壁较近的土体,由于其变形和相对位移较大,则采用颗粒流法模拟。因本文研究基于极限状态进行分析,故颗粒流与有限元模型均采用摩尔库仑本构模型,井壁由刚性墙体模拟。通过控制墙体以恒定速度缓慢背向土体移动,使墙后土体应力状态逐步调整。随着墙体位移增

加,作用于挡土墙的土压力逐渐减小,最终趋于稳定,表明土体已达到主动极限平衡状态。此时,通过计算墙体所承受的水平方向作用力,即可获得竖井井壁的主动土压力值。

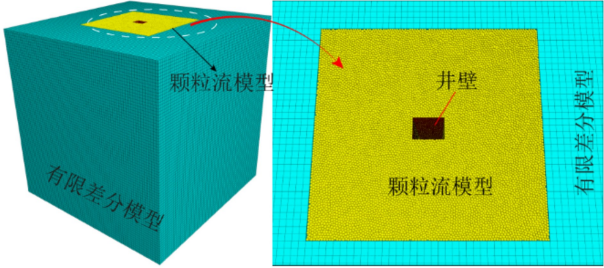


图 8 方形深竖井颗粒流与有限差分耦合模型

提取井壁长边中轴线的土压力,将空间状态下本文理论解、现场实测数据与数值模拟结果进行对比,结果如图 9 所示。由图 9 可知,数值模拟与现场实测数据分布趋势相同,主要分为近似于线性增加、保持平稳和快速减小 3 个阶段,整体表现出非线性分布规律。3 号竖井井壁长边的宽高比为 0.194,小于其临界宽高比(0.347),依据前文分析结果,当 $n < n_{cr}$ 时,单位井壁宽度上的主动土压力随深度的变化可分为曲线增长与基本不变两个阶段。理论解与数值模拟、现场实测数据前两阶段的结果吻合较好,峰值偏差小于 2%,趋势一致;但在第三阶段,因本文理论解未考虑井底基础约束导致的土体位移差,未能再现数值解中出现的土压力骤降现象。方形竖井数值模拟的滑动体如图 10 所示,在主动土压力状态下,竖井上部破坏体为三棱柱,下部为顶面为三角形的楔形体,与理论推导的 $n < n_{cr}$ 分布较为吻合。因此,理论解能够有效预测方形竖井的主动土压力分布特征,使用该空间主动土压力理论解分析方形竖井空间主动土压力分布特征具有适用性,空间主动土压力随埋深呈非线性增长。

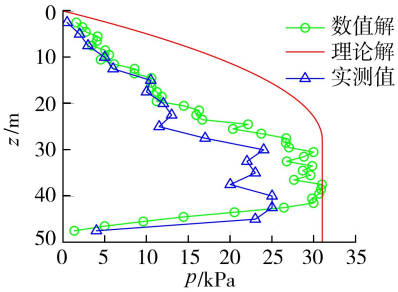


图 9 理论解与数值解、现场实测结果对比

为进一步验证本文模型与理论解的适用性,选取文献[16]的竖井案例进行对比分析。竖井平面尺寸为 $18\text{ m} \times 0\text{ m}$,埋深 56 m,土体参数如下:容重 $\gamma = 20\text{ kN/m}^3$,黏聚力 $c = 0\text{ kPa}$,内摩擦角 $\varphi = 30^\circ$,墙-土摩擦角 $\delta = 20^\circ$ 。在宽高比 $n = 0.32$ 的条件下,

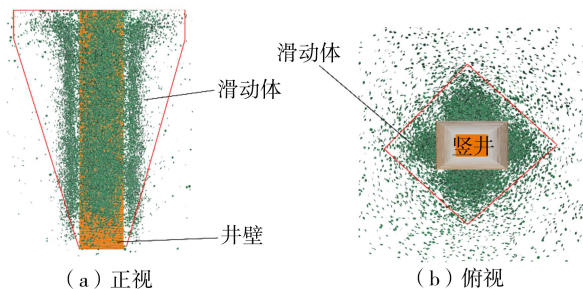


图 10 数值模拟滑动体形状

本文理论解与文献[16]结果的对比如图 11 所示,文献[16]理论解主动土压力系数为常数,土压力呈线性分布;而本文模型考虑到主动土压力系数并非一直不变,而是与埋深等参数相关的函数(式(13)),与文献[16]数值解分布规律一致,复现了由于土拱效应使土压力随埋深非线性增长的特征。因此,本文建立的非线性解析模型更符合方形竖井真实受力情况。

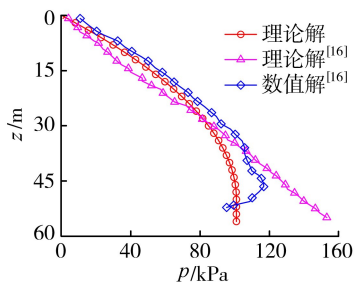


图 11 挡土墙中轴线土压力理论解与文献[16]结果对比

4 结 论

a. 方形竖井挡土墙后填土的滑动体形态受宽高比控制,可分为两类:当宽高比较小时,滑动体由上部的三棱柱与下部的顶面为三角形的楔形体组合而成;当宽高比较大时,滑动体为单一的、顶面呈梯形的楔形体。

b. 随着埋深的增大,主动土压力逐渐增大,增大速率逐渐减小;相同埋深下,随着挡土墙宽高比的增大,主动土压力逐渐增大。

c. 选取宽高比阈值为 10,挡土墙宽高比小于 10 时,土压力设计应选取空间状态下的土压力;挡土墙宽高比大于 10 时,土压力库仑解与真实土压力差异小于 10%,可近似选取平面状态下的土压力设计方形竖井支护结构,简化土压力的计算过程。

d. 由于一般方形竖井工程井壁的宽高比通常不超过 1,因此类似方形竖井的土压力分布呈现出显著的空间效应,沿埋深表现为先非线性增长、后趋于稳定的特征,因此在进行方形竖井支护结构设计时,应考虑分段进行支护结构设计,降低工程成本。

参考文献:

- [1] Tom Wörden F, Achmus M. Numerical modeling of three-dimensional active earth pressure acting on rigid walls [J]. Computers and Geotechnics, 2013, 51: 83-90.
- [2] Lin Yuliang, Leng Wuming, Yang Guolin, et al. Seismic active earth pressure of cohesive-frictional soil on retaining wall based on a slice analysis method [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015, 70: 133-147.
- [3] 罗章波, 亢佳伟, 李仑, 等. 黄土-古土壤地层深竖井受力变形特征研究 [J]. 铁道工程学报, 2024, 41(3): 1-6. (Luo Zhangbo, Kang Jiawei, Li Lun, et al. Research on the stress and deformation characteristics of vertical shafts in loess paleosol stratum [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2024, 41(3): 1-6. (in Chinese))
- [4] Lei Mingfeng, Li Jin, Zhao Chenyang, et al. Pseudodynamic analysis of three-dimensional active earth pressures in cohesive backfills with cracks [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021, 150: 106917.
- [5] Xu Jingshu, Wang Pengfu, Huang Fu, et al. Active earth pressure of 3D earth retaining structure subjected to rainfall infiltration [J]. Engineering Geology, 2021, 293: 106294.
- [6] 刘忠玉. 有限无黏性填土刚性挡土墙主动土压力计算 [J]. 中国公路学报, 2018, 31(2): 154-164. (Liu Zhongyu. Active earth pressure calculation of rigid retaining walls with limited granular backfill space [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(2): 154-164. (in Chinese))
- [7] Niedostatkiewicz M, Lesniewska D, Tejchman J. Experimental analysis of shear zone patterns in cohesionless for earth pressure problems using particle image velocimetry [J]. Strain, 2011, 47(S2): 218-231.
- [8] Patel S, Deb K. Study of active earth pressure behind a vertical retaining wall subjected to rotation about the base [J]. International Journal of Geomechanics, 2020, 20(4): 04020028.
- [9] 应宏伟, 黄东, 谢新宇. 考虑邻近地下室外墙侧压力影响的平动模式挡土墙主动土压力研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增刊 1): 2970-2978. (Ying Hongwei, Huang Dong, Xie Xinyu. Study of active earth pressure on retaining wall subject to translation mode considering lateral pressure on adjacent existing basement exterior wall [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(S1): 2970-2978. (in Chinese))
- [10] Jaradat K A, Abdelaziz S L. On the use of discrete element method for multi-scale assessment of clay behavior [J]. Computers and Geotechnics, 2019, 112: 329-341.
- [11] 孙佳政. 不同位移模式下挡土墙非极限主动土压力研

究[D]. 杭州:浙江大学,2023.

[12] 关晓迪,何盛东,魏欢欢,等. 基于 Mogi-Coulomb 强度准则的竖井井壁压力计算[J]. 建井技术,2022,43(1): 15-20. (Guan Xiaodi, He Shengdong, Wei Huanhuan, et al. Calculation on pressure in mine shaft lining based on Mogi-Coulomb strength criterion[J]. Mine Construction Technology,2022,43(1): 15-20. (in Chinese))

[13] Cheng Y M, Hu Y Y, Wei W B. General axisymmetric active earth pressure by method of characteristics-theory and numerical formulation[J]. International Journal of Geomechanics,2007,7(1):1-15.

[14] Chehadeh A, Turan A, Abed F, et al. Lateral earth pressures acting on circular shafts considering soil-structure interaction [J]. International Journal of Geotechnical Engineering,2019,13(2): 139-151.

[15] 朱正国,安辰亮,朱永全,等. 地铁深竖井土压力理论研究[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(增刊2):3776-3783. (Zhu Zhengguo, An Chenliang, Zhu Yongquan, et al. Research on soil pressure theory of deep subway shaft [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2013,32(S2):3776-3783. (in Chinese))

[16] 应宏伟,梁文鹏. 方竖井基坑平动模式挡墙的主动土压力[J]. 上海交通大学学报,2018,52(11): 1459-1466. (Ying Hongwei, Liang Wenpeng. Spatial active earth pressure against translating retaining walls in square shaft excavations[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2018,52(11):1459-1466. (in Chinese))

[17] Benmebarek S, Khelifa T, Benmebarek N, et al. Numerical evaluation of 3D passive earth pressure coefficients for retaining wall subjected to translation[J]. Computers and Geotechnics,2008,35(1):47-60.

[18] Schmüdderich C, Tschuchnigg F, Wichtmann T. Rigorous lower and upper bounds for the 3D passive earth pressure problem[J]. Géotechnique Letters, 2020, 10(2): 100-105.

[19] Yang Xiaoli, Li Zhengwei. Upper bound analysis of 3D static and seismic active earth pressure[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2018,108:18-28.

[20] Li Zhengwei, Yang Xiaoli. Three-dimensional active earth pressure for retaining structures in soils subjected to steady unsaturated seepage effects[J]. Acta Geotechnica, 2020,15(7):2017-2029.

[21] Li Zhengwei Yang Xiaoli. Three-dimensional active earth pressure under transient unsaturated flow conditions[J]. Computers and Geotechnics,2020,123:103559.

[22] Soubra A H, Galvani D, Regenass P. Three-dimensional active earth pressures[C]//Barcelona:European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering. Barcelona:ECCOMAS,2000.

[23] 顾慰慈. 挡土墙土压力计算[M]. 北京:中国建材工业出版社,2001:240-242.

[24] 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. (Zhang Hengzhi, Xu Changjie, He Zhaibing, et al. Study of active earth pressure of finite soils under different retaining wall movement modes based on discrete element method[J]. Rock and Soil Mechanics,2022,43(1):257-267. (in Chinese))

(收稿日期:2025-03-18 编辑:熊水斌)

(上接第 54 页)

[11] 王学斌,畅建霞,孟雪姣,等. 基于改进 NSGA-II 的黄河下游水库多目标调度研究[J]. 水利学报,2017,48(2): 135-145. (Wang Xuebin, Chang Jianxia, Meng Xuejiao, et al. Research on multi-objective operation based on improved NSGA-II for the lower Yellow River[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2017,48(2): 135-145. (in Chinese))

[12] 吴云,曾超,杨侃,等. 基于改进 NSGA-II 算法的水资源多目标优化配置[J]. 人民黄河,2020,42(5): 71-75. (Wu Yun, Zeng Chao, Yang Kan, et al. Multi-objective optimal allocation of water resources based on improved NSGA-II algorithm[J]. Yellow River, 2020,42(5): 71-75. (in Chinese))

[13] 陈立华,梅亚东,董雅洁,等. 改进遗传算法及其在水库群优化调度中的应用[J]. 水利学报,2008,39(5): 550-556. (Chen Lihua, Mei Yadong, Dong Yajie, et al. Improved genetic algorithm and its application in optimal dispatch of cascade reservoirs[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2008,39(5):550-556. (in Chinese))

[14] Deb K, Jain H. An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point-based nondominated sorting approach, part I: solving problems with box constraints [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation,2014,18(4):577-601.

[15] Heidari M, Chow V T, Kokotović P V, et al. Discrete differential dynamic programming approach to water resources systems optimization [J]. Water Resources Research,1971,7(2):273-282.

[16] 蒋志强. 嵌套结构并行多维动态规划算法及其应用研究[D]. 北京:华北电力大学,2015.

[17] 丁洋洋. 分解策略型多目标进化算法中的自适应机制研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2018.

(收稿日期:2025-03-09 编辑:俞云利)