

《建筑边坡工程技术规范》中主动土压力计算公式的优化探讨

姚永鹏^{1,2}, 谭海英², 谢配红²

(1. 贵州遵义106地质矿业有限责任公司, 贵州 遵义 563000;
2. 贵州省地质矿产勘查开发局106地质大队, 贵州 遵义 563000)

[摘要]《建筑边坡工程技术规范》中计算主动土压力公式较为冗长、理解难度大, 不易被人掌握。本文基于库仑土压力理论, 将墙体与墙后填土之间的力以综合内摩擦角考虑后, 推导得出了优化计算主动土压力的通用解析式。通过算例验证表明通用解析式和规范公式计算主动土压力结果近似; 在相同条件下, 规范中土压力公式均可由通用解析式推导得出。与规范公式相比, 通用解析式具备原理清晰易掌握、公式简洁明了、计算过程简单快捷的特点, 计算精度能满足工程要求, 在实际工作中具有较好的使用价值。

[关键词]建筑边坡工程技术规范; 主动土压力; 优化; 库仑土压力理论; 综合内摩擦角

[中图分类号]X141 **[文献标识码]**A **[文章编号]**1000-5943(2024)04-437-09

0 引言

库仑土压力理论自1776年提出至今已200多年, 时至今日, 库仑土压力理论依旧被各类规范、教材和手册作为主要计算土压力的方法之一, 也是广大工程师在计算土压力时首选的方法。李广信等(2013)在土力学教材中将库仑土压力理论描述为:“适用于各类填土面和不同的墙背条件, 且方法简便, 具备足够的计算精度, 至今仍是一种广泛采用的土压力理论;”陈文胜等(2013)认为库仑土压力理论能得到广泛应用的原因主要体现在库仑土压力理论用简练的方法解决了复杂的问题, 是目前解决土压力问题最简洁的途径之一。

目前求解土压力的方法主要有图解法、有限元法和数解法等。较为常用的图解法有库尔曼图解法, 库尔曼图解法具有适用范围广、原理清晰特点, 但做图精度直接影响到图解土压力的精度。在库尔曼图解法的基础上, 张仲捷等(1987)和王

奎华等(2003)进行了改进, 降低一定的作图量, 计算精度有所提高, 但做图工作量较大和精度问题还是不便于日常使用。狄圣杰等(2010)运用库尔曼图解法求解土压力的思路, 推导出黏性土的土压力公式, 并利用VB编程计算土压力; 李炼等(2021)通过建立坐标系给出滑体的自重和破裂面的长度的表达式, 利用计算机编程计算复杂坡面荷载下的无粘性土的墙背土压力; 两种方法均采用编程计算, 对不具备编程能力的用户不是很友好。应宏伟等(2011)利用有限元数值分析方法得出了有限范围填土的主动土压力系数和破裂面倾角的求解公式, 有限元方法虽是一种行之有效的工程分析手段, 但应用繁琐, 需要建立模型和做出假设, 不易于工程师们掌握。吕犇(2019)和陈伟平等(2023)先后基于库仑土压力理论下力多边形的相互关系得出了黏性土的数解公式, 并通过工程实例验证计算后得出精度满足要求的结论; 但在公式推导过程中忽略了墙背与填土之间的粘聚力, 使得推导过程有一定的瑕疵。

[收稿日期]2024-01-09 **[修回日期]**2024-08-30

[基金项目]贵州省地矿局106地质大队科研项目资助(黔地矿106科合[2021]6号)

[作者简介]姚永鹏(1991—), 男, 工程师, 本科, 主要从事岩土工程和水工环地质等工作。E-mail:857795247@qq.com。

[通讯作者]谭海英(1988—), 男, 高级工程师, 本科, 主要从事水工环地质等工作。E-mail:545363265@qq.com。

工程师们在实际工作中多采用《建筑边坡工程技术规范》提供的公式计算主动土压力;由于规范公式较为冗长、原理性不强、理解难度大,不易被人掌握,导致实际工作中部分工程师只能机械的“套公式”,对于计算结果的合理性无法做出有效的判断。为此,笔者在前人研究成果基础之上,基于库仑土压力理论,将墙体与墙后填土之间的力以综合内摩擦角 δ 考虑后推导得出了优化计算主动土压力的数解解析式,笔者在本文中将该数解解析式称为“通用解析式”。

1 解析式推导和算例验证

相关研究表明(李广信等, 2013; 张玉伟,

2018),基于库仑土压力理论的库仑公式计算主动土压力计算结果比较接近于实际,而计算被动土压力误差较大;因此,本文主要针对主动土压力解析式的相关问题进行探讨。

1.1 解析式推导

基于库仑土压力理论,在满足楔形体整体处于极限平衡状态、刚体滑动假设和平面滑动假设的前提,对于无黏性土(图1(a)),在三力平衡下(图1(b)),利用正弦定理求得主动土压力解析式。

$$\frac{E_a}{\sin(\theta-\varphi)} = \frac{W}{\sin[180-(\theta-\varphi+\alpha-\delta)]}$$

$$\Rightarrow E_a = \frac{W \sin(\theta-\varphi)}{\sin(\theta-\varphi+\alpha-\delta)} \quad (1)$$

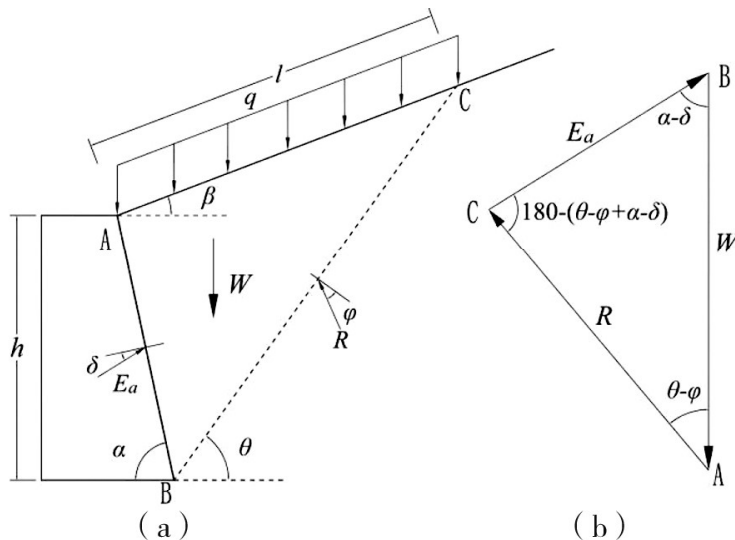


图1 无黏性土($c=0$)库仑主动土压力示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Coulomb's active earth pressure of non-cohesive soil($c=0$)

式中, W 和 l 的求解可根据图1(a)中三角形ABC的相互关系,按正弦定理求得。

$$l = \frac{h \sin(\alpha+\theta)}{\sin \alpha \sin(\theta-\beta)} \quad (2)$$

$$W = \frac{1}{2} \gamma h^2 \frac{\sin(\alpha+\theta) \sin(\alpha+\beta)}{\sin^2 \alpha \sin(\theta-\beta)} + qh \frac{\sin(\alpha+\theta) \cos \beta}{\sin \alpha \sin(\theta-\beta)}$$

$$= \frac{1}{2} \gamma h^2 \frac{\sin(\alpha+\theta) \sin(\alpha+\beta)}{\sin^2 \alpha \sin(\theta-\beta)} \left(1 + \frac{2q \sin \alpha \cos \beta}{\gamma h \sin(\alpha+\beta)}\right) \quad (3)$$

式中: E_a 为主动土压力(kN/m); W 为楔形体自重及地表附加荷载(kN/m); l 为附加荷载在斜坡面的长度(m), φ 为土的内摩擦角($^\circ$); δ 为土对挡墙背的摩擦角($^\circ$); β 为填土表面与水平面的夹角($^\circ$); α 为支档结构墙背与水平面的夹角($^\circ$)。

当考虑墙后填土为黏性土($c \neq 0$)时,陈文胜等(2013,2014a,2014b,2015)认为库仑土压力求解时

墙背与填土之间并非一定要达到极限平衡状态,只需要墙后土楔体在破裂面上达到极限平衡状态即可。笔者认为由于主动土压力需要的位移很小,当破裂面土体有滑动趋势或者达到临界状态时,墙背与土体之间类似于“静摩擦”的状态。基于此,在挡墙墙背与填土间不形成第二滑移面(非坦墙)和不考虑地表裂缝的前提下,参照规范相关内容,笔者将墙体与墙后填土之间的力以综合内摩擦角 δ 考虑。在此基础上,楔形隔离体在 W 、 R 、 E_a 和 cL 四力下平衡,四力平衡如图2(b)所示。

根据正弦定理,在三角形ABC中,有:

$$\frac{BC}{\sin(\theta-\varphi)} = \frac{AB}{\sin[180-(\theta-\varphi+\alpha-\delta)]}$$

$$\Rightarrow BC = \frac{AB \sin(\theta-\varphi)}{\sin(\theta-\varphi+\alpha-\delta)} \quad (4)$$

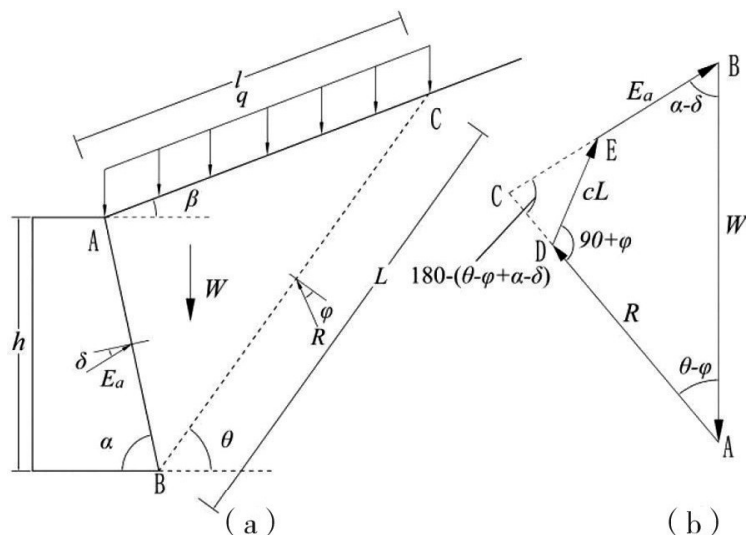


图2 黏性土(c≠0)库仑主动土压力示意图

Fig. 2 Schematic diagram of Coulomb's active earth pressure of viscous soil (c≠0)

在三角形 CDE 中,有:

$$\frac{CE}{\sin[180-(90+\varphi)]} = \frac{DE}{\sin[180-(\theta-\varphi+\alpha-\delta)]}$$

$$\Rightarrow CE = \frac{DE \cos \varphi}{\sin(\theta-\varphi+\alpha-\delta)} \quad (5)$$

$$BE = BC - CE = \frac{AB \sin(\theta-\varphi) - DE \cos \varphi}{\sin(\theta-\varphi+\alpha-\delta)} \quad (6)$$

将 $AB=W$ 、 $DE=cL$ 和 $BE=E_a$ 分别代入后有:

$$E_a = \frac{W \sin(\theta-\varphi) - cL \cos \varphi}{\sin(\theta-\varphi+\alpha-\delta)} \quad (7)$$

式中, l 按照式(2)计算, W 按照式(3)计算, L 的求解可根据图 2(a) 中三角形 ABC 的相互关系, 按正弦定理求得。

$$L = \frac{h \sin(\alpha+\beta)}{\sin \alpha \sin(\theta-\beta)} \quad (8)$$

式中: L 为破裂面长度(m); c 为土的粘聚力(kPa); φ 为土的内摩擦角($^\circ$); δ 为土对挡墙背的摩擦角($^\circ$)。

式(7)即为通用解析式。式(7)中当 $c=0$ 时, 即可得到与式(1)相同的解析式。

当考虑地震作用下的主动土压力计算, 按照《建筑边坡工程技术规范》6.2.11 条条文明确:“土的重度除以地震角的余弦, 墙背填土的内摩擦角和墙背摩擦角分别减去和增加地震角”, 楔形隔离体在 W 、 W_e 、 R' 、 E_{ae} 和 cL 五力下平衡(图 3)。

通过地震角的转换, 将楔形隔离体 W 、 W_e 、 R' 、 E_{ae} 和 cL 五力平衡通过几何关系转换成 W' 、 R' 、 E_{ae} 和 cL 四力下平衡。根据力平衡示意图, 根据正弦定理得出地震作用下的通用解析式。

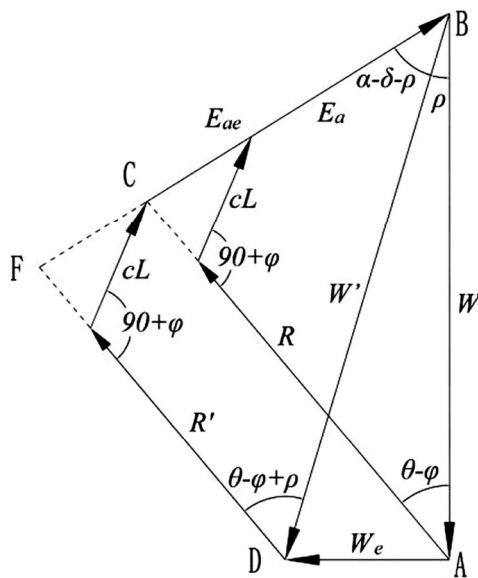


图3 地震作用下力平衡示意图

Fig. 3 Schematic diagram of force balance under earthquake action

$$W' = \frac{1}{2} \gamma h^2 \frac{\sin(\alpha+\theta) \sin(\alpha+\beta)}{\cos \rho \sin^2 \alpha \sin(\theta-\beta)} + \frac{qh \sin(\alpha+\theta) \cos \beta}{\cos \rho \sin \alpha \sin(\theta-\beta)}$$

$$= \frac{1}{2} \gamma h^2 \frac{\sin(\alpha+\theta) \sin(\alpha+\beta)}{\cos \rho \sin^2 \alpha \sin(\theta-\beta)} \left(1 + \frac{2q \sin \alpha \cos \beta}{\gamma h \sin(\alpha+\beta)} \right) \quad (9)$$

$$E_{ae} = \frac{W' \sin(\theta-\varphi+\rho) - cL \cos \varphi}{\sin(\theta-\varphi+\alpha-\delta)} \quad (10)$$

式中: E_{ae} 为地震作用下的主动土压力(kN/m); W' 为地震作用下楔形体自重及地表附加荷载(kN/m); ρ 为地震角($^\circ$)。

1.2 计算方法

基于平面滑动的假设, 土体滑动对应的主动土压力必定是所有假设滑动面中对应土压力最大

的一个,规范公式是利用 $dE/d\theta=0$ 的条件求得极值下的解析表达式;本文主要采用列举法,计算过程主要是将破裂角 θ 在 $(0^\circ, 90^\circ)$ 范围内按照一定步长依次代入通用解析式后求得破裂角 θ 在 $(0^\circ, 90^\circ)$ 范围内的土压力分布,取计算结果中相对较大值作为主动土压力值,与之对应的角度为破裂角。

列举法实现的载体有函数计算器、Excel 表格和编程计算等,其中函数计算器和 Excel 表格实现难度低,过程简单快捷,推荐使用。

1.3 算例验证

某重力式挡土墙高 5 m,墙背与水平面夹角 $\alpha = 70^\circ$,填土面倾角 $\beta = 12^\circ$,填土为黏性土,重度 $\gamma = 19.2 \text{ kN/m}^3$,内摩擦角 $\varphi = 22^\circ$,粘聚力 $c = 7 \text{ kPa}$,填土与墙背的摩擦角 $\delta = 17^\circ$,地表均布荷载 $q = 18 \text{ kPa}$,地震角 $\rho = 6^\circ$,场地无地下水。试分别计算不考虑地震作用和考虑地震作用下的主动土压力。

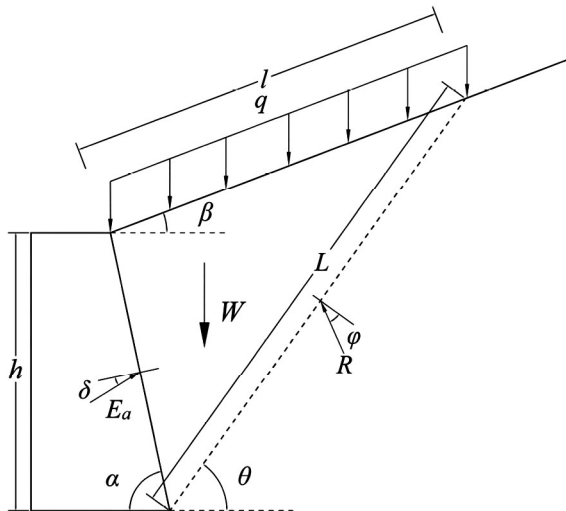


图4 算例计算配图

Fig. 4 Calculation diagram of example

方法一:按照《建筑边坡工程技术规范》6.2.3条、6.2.11条公式计算,计算结果为不考虑地震作用: $K_{ae}=0.7827, E_a=187.85 \text{ kN/m}$;考虑地震作

表3 算例计算结果对比

Table 3 Comparison of calculation results of calculation examples

类别	不考虑地震作用		考虑地震作用	
	主动土压力 $E_a(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	破裂角 $\theta(^{\circ})$	主动土压力 $E_{ae}(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	破裂角 $\theta(^{\circ})$
本文方法	187.84	53.7	238.91	43.5
规范方法	187.85	—	238.92	—

用: $K_{ae}=0.9955, E_{ae}=238.92 \text{ kN/m}$ 。

方法二:通用解析式计算

采用 Excel 表格计算,将通用解析式(7)、式(10)和数据分别输入至 Excel 中,按照步长 0.1° 计算 $(0^\circ, 90^\circ)$ 范围内对应的土压力。不考虑地震作用计算结果示例表格见表1,考虑地震作用计算结果示例表格见表2。

表1 Excel 计算不考虑地震作用的破裂角及主动土压力

Table 1 Calculation of rupture angle and active earth pressure without considering earthquake action by Excel

破裂角 $\theta(^{\circ})$	主动土压力 $E_a(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$
...	...
53.4	187.829
53.5	187.834
53.6	187.836
53.7	187.837
53.8	187.835
53.9	187.832
54.0	187.827
...	...

表2 Excel 计算地震下破裂角及主动土压力

Table 2 Calculation of rupture angle and active earth pressure under earthquake by Excel

破裂角 $\theta(^{\circ})$	地震作用下土压力 $E_{ae}(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$
...	...
43.2	238.898
43.3	238.905
43.4	238.908
43.5	238.910
43.6	238.908
43.7	238.904
43.8	238.897
...	...

在 Excel 中将计算结果绘制成图表后(图5、图6),可直观显示土压力随破裂角的变化曲线。两种方法计算结果对比见表3。

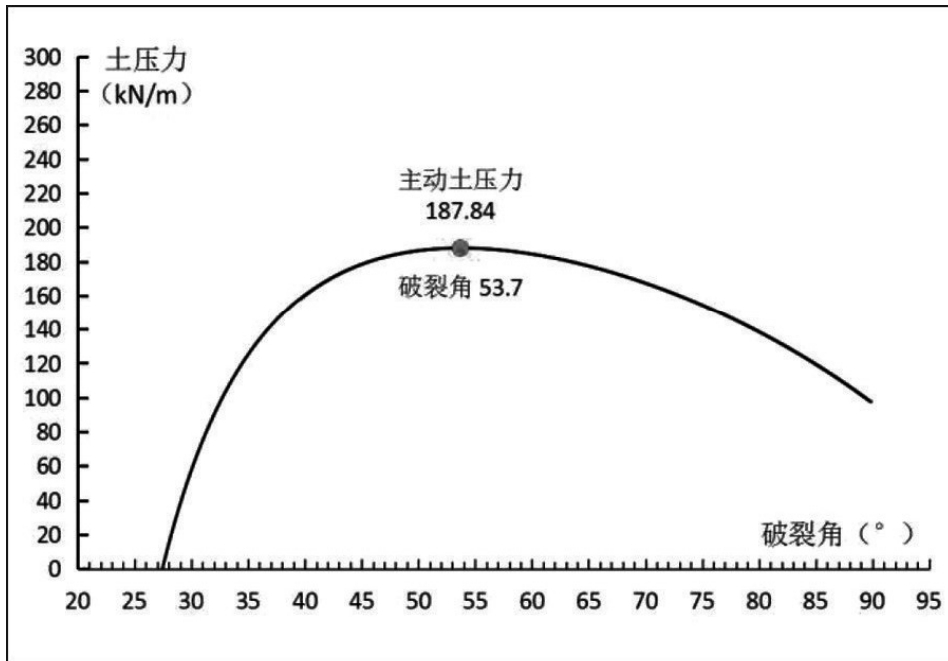


图5 不考虑地震作用的主动土压力分布图

Fig. 5 Active earth pressure distribution without considering earthquake action

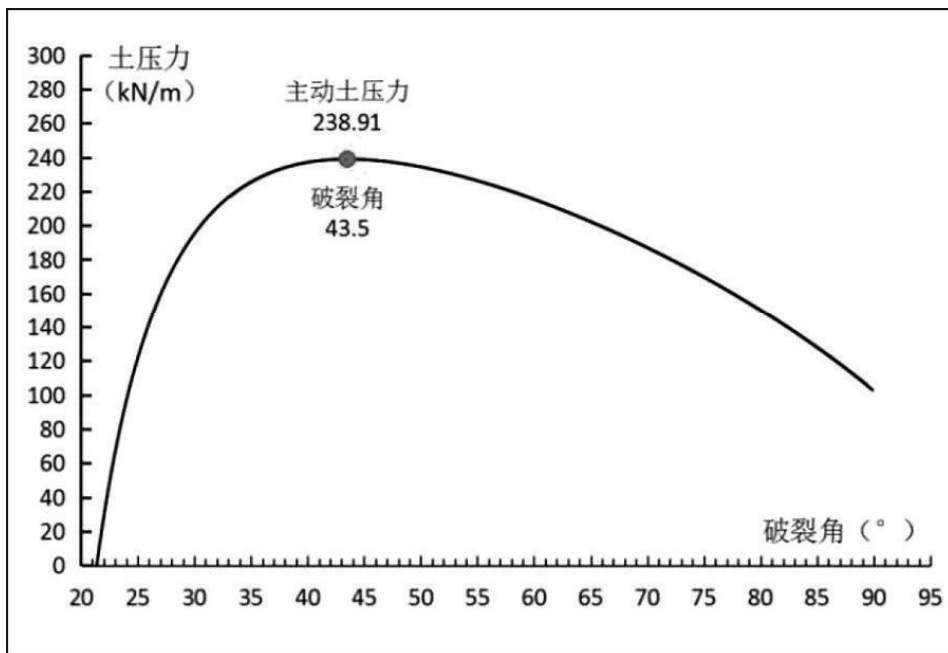


图6 地震作用下主动土压力分布图

Fig. 6 Active earth pressure distribution under earthquake action

算例结果显示,通用解析式和规范公式计算结果基本一致,经过分析,出现误差的主要原因是计算过程中数据精度的问题导致。

由于篇幅有限,笔者未列出更多算例;在本文撰写过程中笔者采用大量的数据对比验证,计算结果显示通用解析式和规范公式计算结果基本一致。计算结果表明采用通用解析式计算主动土压力合理且可靠,计算精度能满足工程的要求。

2 规范不同情况下土压力公式的推导

《建筑边坡工程技术规范》中列举了不同情况下土压力的计算公式,经过分析研究,规范中土压力计算公式均可由通用解析式推导而出,现将推导过程依次叙述如下。

2.1 有限范围填土

当破裂角小于坡后稳定岩石坡面倾角 θ 时 (图7),按照有限范围填土计算主动土压力。由通用解析式推导过程如下:

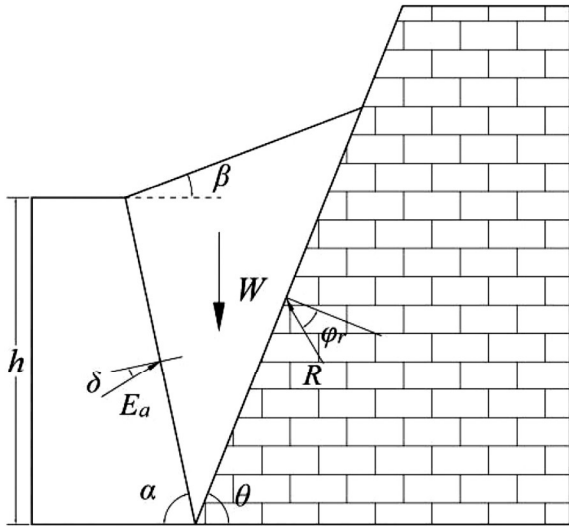


图7 有限范围填土计算示意图

Fig. 7 Schematic diagram of limited scope filling calculation

$$E_a = \frac{W \sin(\theta - \varphi) - cL \cos \varphi}{\sin(\theta - \varphi + \alpha - \delta)}$$

$$= \frac{1}{2} \gamma h^2 \frac{\sin(\alpha - \theta) \sin(\alpha + \beta) \sin(\theta - \delta_r)}{\sin^2 \alpha \sin(\theta - \beta) \sin(\theta - \delta_r + \alpha - \delta)}$$

$$\frac{ch \sin(\alpha + \beta) \cos \delta_r}{\sin \alpha \sin(\theta - \beta) \sin(\theta - \delta_r + \alpha - \delta)} \quad (11)$$

$$E_a = \frac{1}{2} \gamma h^2 \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin(\theta - \delta_r + \alpha - \delta) \sin(\theta - \beta)}$$

$$\times \left[\frac{\sin(\alpha + \theta)}{\sin^2 \alpha} \sin(\theta - \delta_r) - \frac{2c \cos \delta_r}{\gamma h \sin \alpha} \right] \quad (12)$$

$$\Rightarrow K_a = \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin(\theta - \delta_r + \alpha - \delta) \sin(\theta - \beta)}$$

$$\times \left[\frac{\sin(\alpha + \theta)}{\sin^2 \alpha} \sin(\theta - \delta_r) - \frac{2c \cos \delta_r}{\gamma h \sin \alpha} \right] \quad (13)$$

式中: θ 为稳定岩石坡面的倾角($^\circ$); δ_r 为稳定且无软弱层的岩石坡面与填土之间的内摩擦角($^\circ$)。

式(13)中 K_a 解析式与《建筑边坡工程技术规范》6.2.8公式一致。

2.2 水平土压力合力

当边坡的坡面切斜、坡顶水平、无超载 (图8),土压力方向与重力方向垂直,则 $\alpha - \delta = 90^\circ$,按照通用解析式推导如下:

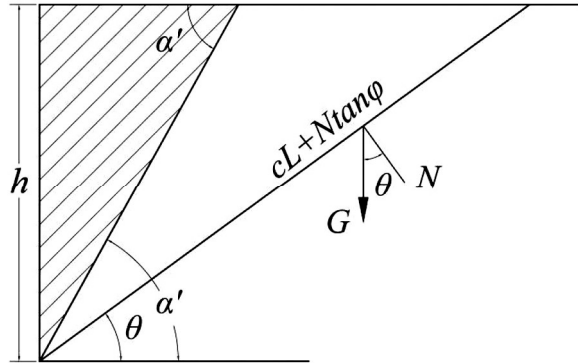


图8 水平土压力合力计算示意图

Fig. 8 Schematic diagram of horizontal earth pressure resultant for calculation

$$E_a = \frac{G \sin(\theta - \varphi) - cL \cos \varphi}{\sin(\theta - \varphi + \alpha - \delta)}$$

$$= \frac{1}{2} \gamma h^2 \left(\frac{1}{\tan \theta} - \frac{1}{\tan \alpha'} \right) \sin(\theta - \varphi) - \frac{ch}{\sin \theta} \cos \varphi$$

$$= \frac{1}{2} \gamma h^2 \left[(\cot \theta - \cot \alpha') \tan(\theta - \varphi) - \frac{2c \cos \varphi}{\gamma h \sin \theta \cos(\theta - \varphi)} \right]$$

$$\Rightarrow K_a = (\cot \theta - \cot \alpha') \tan(\theta - \varphi) - \frac{\eta \cos \varphi}{\sin \theta \cos(\theta - \varphi)} \quad (14)$$

式(14)中 K_a 解析式与《建筑边坡工程技术规范》6.2.9公式相同。

2.3 侧向岩石压力及地震主动岩石压力

沿外倾结构面滑动的岩石边坡 (图9),其主动岩石压力解析式按照通用解析式推导如下:

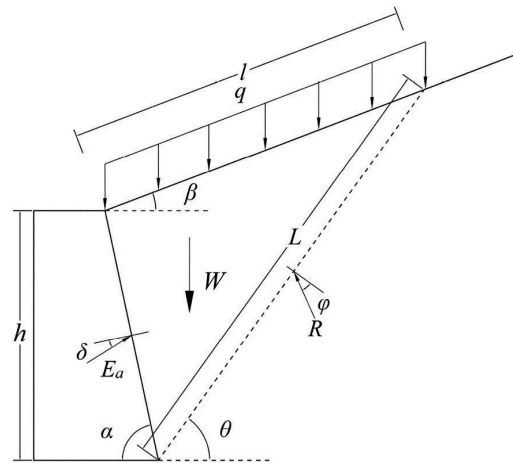


图9 主动岩石压力计算示意图

Fig. 9 Schematic diagram of active rock pressure calculation

$$W = \frac{1}{2} \gamma h^2 \frac{\sin(\alpha + \theta) \sin(\alpha + \beta)}{\sin^2 \alpha \sin(\theta - \beta)} \left(1 + \frac{2q \sin \alpha \cos \beta}{\gamma h \sin(\alpha + \beta)} \right)$$

$$= \frac{1}{2} \gamma h^2 \frac{\sin(\alpha + \theta) \sin(\alpha + \beta)}{\sin^2 \alpha \sin(\theta - \beta)} K_q \quad (15)$$

$$L = \frac{h \sin(\alpha + \beta)}{\sin \alpha \sin(\theta - \beta)} \quad (16)$$

将式(15)和式(16)代入:

$$\begin{aligned} E_a &= \frac{W \sin(\theta - \varphi) - cL \cos \varphi}{\sin(\theta - \varphi + \alpha - \delta)} \\ &= \frac{1}{2} \gamma h^2 \frac{K_q \sin(\alpha + \theta) \sin(\alpha + \beta) \sin(\theta - \varphi_s)}{\sin^2 \alpha \sin(\theta - \beta) \sin(\theta - \varphi_s + \alpha - \delta)} \\ &\quad - \frac{c_s h \sin(\alpha + \beta) \cos \varphi_s}{\sin \alpha \sin(\alpha - \beta) \sin(\theta - \varphi_s + \alpha - \delta)} \\ &= \frac{1}{2} \gamma h^2 \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin^2 \alpha \sin(\theta - \beta) \sin(\theta - \varphi_s + \alpha - \delta)} \\ &\quad \times \left[K_q \sin(\alpha + \theta) \sin(\theta - \varphi_s) - \frac{2c_s \sin \alpha \cos \varphi_s}{\gamma h} \right] \quad (17) \end{aligned}$$

$$\Rightarrow K_a = \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin^2 \alpha \sin(\theta - \beta) \sin(\theta - \varphi_s + \alpha - \delta)} \times [K_q \sin(\alpha + \theta) \sin(\theta - \varphi_s) - \eta \sin \alpha \cos \varphi_s] \quad (18)$$

式中: θ 为边坡外倾结构面倾角($^\circ$); φ_s 为边坡外倾结构面内摩擦角($^\circ$); c_s 为边坡外倾结构面粘聚力(kPa); δ 为岩石与挡墙背的摩擦角($^\circ$)。

式(18)中 K_a 解析式与《建筑边坡工程技术规范》6.3.1公式相同。

在式(18)中 K_a 表达式基础上,按照建筑边坡工程技术规范》6.2.11条条文说明,地震作用下主动岩石压力系数为:

$$K_a = \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\cos \rho \sin^2 \alpha \sin(\theta - \beta) \sin(\theta - \varphi_s + \alpha - \delta)} \times [K_q \sin(\alpha + \theta) \sin(\theta - \varphi_s + \rho) - \eta \sin \alpha \cos \varphi_s \cos \rho] \quad (19)$$

式(19)中 K_a 解析式与《建筑边坡工程技术规范》6.3.5公式相同。

2.4 主动岩石压力合力

对于沿缓倾的外倾软弱结构面滑动的边坡(图10),其主动岩石压力合力方向与重力方向垂直,则 $\alpha - \delta = 90^\circ$,按照通用解析式推导如下:

$$\begin{aligned} E_a &= \frac{G \sin(\theta - \varphi) - cL \cos \varphi}{\sin(\theta - \varphi + \alpha - \delta)} \\ &= \frac{G \sin(\theta - \varphi_s) - c_s L \cos \varphi_s}{\sin(\theta - \varphi_s + 90)} \\ &= G \tan(\theta - \varphi_s) - \frac{c_s L \cos \varphi_s}{\cos(\theta - \varphi_s)} \quad (20) \end{aligned}$$

式中: G 为四边形滑裂体自重(kN/m); L 为滑裂体长度(m); θ 为边坡外倾软弱结构面倾角($^\circ$); φ_s 为外倾软弱结构面内摩擦角($^\circ$); c_s 为边坡外倾结构面粘聚力(kPa)。

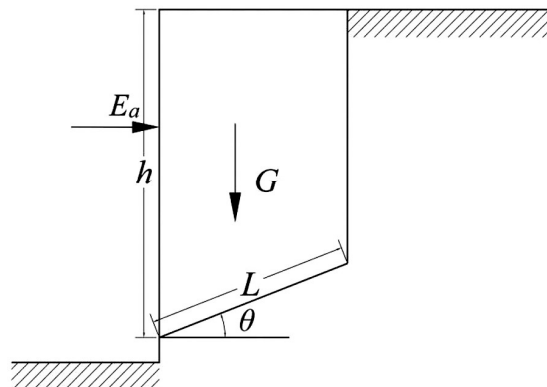


图10 外倾结构面主动岩石压力计算示意图

Fig. 10 Schematic diagram of active rock pressure calculation of outward inclined structural plane

式(20)中 E_a 解析式与《建筑边坡工程技术规范》6.2.9公式相同。

2.5 特殊情况下的侧向压力

2.5.1 对于距离支护结构顶端作用的线分布荷载时(图11),附加侧向应力分布可简化为等腰三角形,最大附加侧向土压力计算式推导如下:

按照规范假设的破裂角 $\theta = 45 + \varphi/2$,将 $c = 0$ 、 $\alpha - \delta = 90^\circ$ 、 $G = Q_L$ 带入通用解析式:

$$\begin{aligned} \text{由 } E_a &= \frac{G \sin(\theta - \varphi) - cL \cos \varphi}{\sin(\theta - \varphi + \alpha - \delta)} \\ &= \frac{Q_L \sin(45 + \frac{\varphi}{2} - \varphi)}{\sin(45 + \frac{\varphi}{2} - 90)} \\ &= Q_L \tan(45 - \frac{\varphi}{2}) = Q_L \sqrt{K_a} \quad (21) \end{aligned}$$

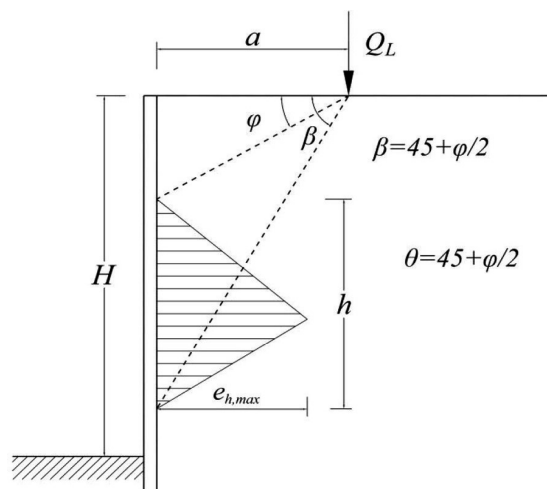


图11 线荷载附加侧向压力计算示意图

Fig. 11 Schematic diagram for calculation of additional lateral pressure of line load

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}he_{h,\max} &= \Delta E_a = Q_L \sqrt{K_a} \\ \Rightarrow e_{h,\max} &= \frac{2}{h} Q_L \sqrt{K_a} \end{aligned} \quad (22)$$

式中： $e_{h,\max}$ 为最大附加侧向压力(kPa)； h 为附加侧向压力分布范围(m)； $h = a(\tan\beta - \tan\varphi)$ ， $\beta = 45 + \varphi/2$ ； Q_L 为线分布荷载标准值(kN/m)； K_a 为主动土压力系数， $K_a = \tan^2(45 - \varphi/2)$ 。

式(22)中 $e_{h,\max}$ 解析式与《建筑边坡工程技术规范》B.0.1公式相同。

2.5.2 对于距离支护结构顶端作用有宽度的均布荷载时(图12)，附加侧向应力分布可简化为矩形，附加侧向土压力计算式推导如下：

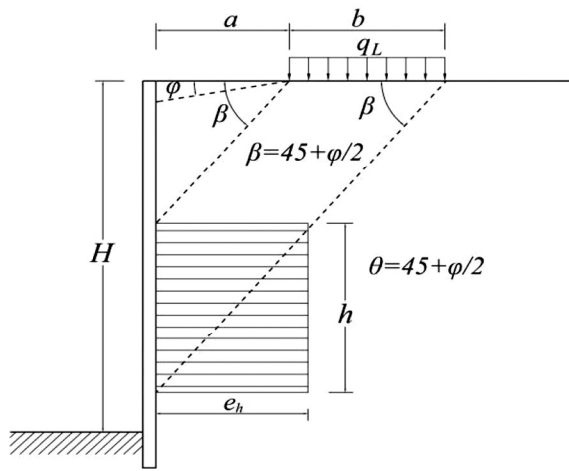


图12 局部荷载附加侧向压力计算示意图

Fig. 12 Schematic diagram for calculation of additional lateral pressure under local load

按照规范假设的破裂角 $\theta = 45 + \varphi/2$ ，将 $c = 0$ 、 $\alpha - \delta = 90^\circ$ 、 $G = q_L \times b$ 带入通用解析式：

$$\begin{aligned} E_a &= \frac{G \sin(\theta - \varphi) - cL \cos\varphi}{\sin(\theta - \varphi + \alpha - \delta)} \\ \Rightarrow \Delta E_a &= \frac{q_L b \sin(45 + \frac{\varphi}{2} - \varphi)}{\sin(45 + \frac{\varphi}{2} - \varphi + 90)} \\ &= q_L b \tan(45 - \frac{\varphi}{2}) = q_L b \sqrt{K_a} \end{aligned} \quad (23)$$

$$\Delta E_a = e_h \times h \quad (24)$$

$$h = b \tan(45 + \frac{\varphi}{2}) = \frac{b}{\sqrt{K_a}} \quad (25)$$

将式(25)代入式(24)，并与式(23)化简后得：

$$\Delta E_a = e_h \times h = q_L b \sqrt{K_a}$$

$$e_h = \frac{\sqrt{K_a}}{b} q_L b \sqrt{K_a} = q_L K_a \quad (26)$$

式中： e_h 为附加侧向压力(kPa)； K_a 为主动土压力系数， $K_a = \tan^2(45 - \varphi/2)$ ； q_L 为局部均布荷载标准值(kPa)。

式(26)中 e_h 解析式与《建筑边坡工程技术规范》B.0.2公式相同。

2.5.3 边坡为二阶且竖直、坡顶水平且无超载(图13)，土压力方向与重力方向垂直，则 $\alpha - \delta = 90^\circ$ ，按照通用解析式推导如下：

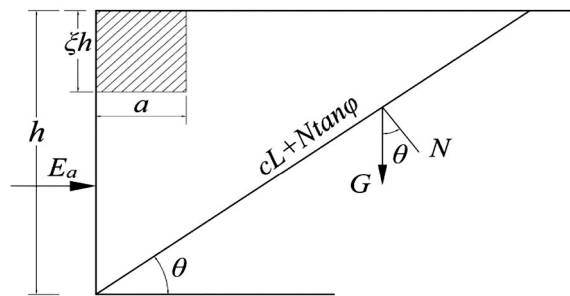


图13 二阶竖直边坡计算示意图

Fig. 13 Calculation diagram of second-order vertical slope

$$\begin{aligned} \text{由 } E_a &= \frac{G \sin(\theta - \varphi) - cL \cos\varphi}{\sin(\theta - \varphi + \alpha - \delta)} \\ &= \frac{(\frac{1}{2}\gamma h^2 \frac{1}{\tan\theta} - \gamma \xi h a) \sin(\theta - \varphi) - \frac{ch}{\sin\theta} \cos\varphi}{\sin(\theta - \varphi + 90)} \\ &= \frac{1}{2} \gamma h^2 \left[\left(\cot\theta - \frac{2\alpha\xi}{h} \right) \tan(\theta - \varphi) - \frac{2c \cos\varphi}{\gamma h \sin\theta \cos(\theta - \varphi)} \right] \end{aligned} \quad (27)$$

$$\Rightarrow K_a = \left(\cot\theta - \frac{2\alpha\xi}{h} \right) \tan(\theta - \varphi) - \frac{\eta \cos\varphi}{\sin\theta \cos(\theta - \varphi)} \quad (28)$$

式中： a 为上阶边坡宽度(m)； ξ 为上阶边坡高度与总边坡高度的比值。

式(28)中 K_a 解析式与《建筑边坡工程技术规范》B.0.4公式相同。

3 结论与讨论

(1) 基于库仑土压力理论，将墙体与墙后填土之间的力以综合内摩擦角考虑后推导得出了优化计算主动土压力的通用解析式。算例验证表明，通用解析式和《建筑边坡工程技术规范》中公式计算主动土压力结果近似；在相同条件下，规范中土压力公式均可由通用解析式推导得出。

(2) 相较于《建筑边坡工程技术规范》中冗长繁复的公式，通用解析式具备原理清晰易掌握、公式简洁明了、计算过程简单快捷的特点，计算精度

能满足工程要求,在实际工作中具有较好的使用价值。

(3)通用解析式计算土压力的同时可直接得出对应的破裂角,弥补了《建筑边坡工程技术规范》中无法求解破裂角的问题。

(4)经过分析研究,当破裂角 θ 已知时,可直接将参数代入通用解析式计算主动土压力。当破裂角 θ 未知、土楔体的自重或附加荷载可用带 θ 的解析式表达时,可采用通用解析式按列举法求解各种条件下的主动土压力。对于破裂角 θ 未知且无法得出墙后土楔体自重或附加荷载关于 θ 表达式的异形坡面,目前通用解析式还无法计算,相关的计算方法还需进一步的研究。

(5)通用解析式在适用性上不局限于《建筑边坡工程技术规范》,同样适用基于库仑土压力理论的其他规范公式,相关研究有待进一步的工作。

[参考文献]

- 陈文胜,李苗苗,张永杰,等. 2013. 对库仑土压力理论的若干修正[J]. 岩土力学,34(07):1832-1838,1846.
- 陈文胜,李苗苗,张永杰,等. 2014a. 对“关于‘对库仑土压力理论的若干修正’的讨论”的答复[J]. 岩土力学,35(03):911-912.
- 陈文胜,李苗苗. 2014b. “对库仑土压力理论的若干修正”的几点补充——兼答复李大钟先生的第2次讨论[J]. 岩土力学,35(12):3644-3646.
- 陈文胜,李苗苗. 2015. “对库仑土压力理论的若干修正”再讨论的回复[J]. 岩土力学,36(07):2127-2128.
- 陈伟平,陆建君. 2023. 简化楔体极限平衡图解法数解土压力探讨[J]. 广东水利水电,(8):82-87.
- 狄圣杰,徐卫亚. 2010. 黏性土求主动土压力的库尔曼法及应用[J]. 岩土工程学报,32(06):970-974.
- GB50330-2013. 2014. 建筑边坡工程技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,27-34,105-109.
- GB50007-2011. 2012. 建筑地基基础设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,46-50.
- 李广信,张丙印,于玉贞. 2013. 土力学[M]. 第2版. 北京:清华大学出版社. 228-235.
- 李炼,郭海强,李安洪,等. 2021. 库仑土压力计算新方法—扫描搜索法[J]. 铁道科学与工程学报,18(03):662-668.
- 吕彝. 2019. 改进型核心公式法计算土压力的应用研究[J]. 黑龙江水利科技,47(11):165-168.
- TB10025-2019. 2019. 铁路路基支挡结构设计规范[S]. 北京:中国铁道出版社,12-13,22-23.
- 王奎华,阙仁波. 2003. 改进的库尔曼图解法及其在土压力计算中的应用[J]. 岩土工程学报,(02):167-169.
- 应宏伟,黄东,谢新宇. 2011. 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,30(S1):2970-2978.
- 张仲捷,魏道埭. 1987. 对挡墙土压力库尔曼(Kullmann)图解法的改进[J]. 工程勘察,(6):6-11,19.
- 张玉伟. 2018. 斜陡边坡前缘挡墙主动土压力计算方法研究[D]. 重庆:重庆交通大学,1-2.

Discussion on the Optimization of Active Earth Pressure Calculation Formula in ‘Technical Code for Building Slope Engineering’

YAO Yong-peng^{1,2}, TAN Hai-ying², XIE Pei-hong²

(1. Guizhou Zunyi 106 Geological Mining Co., LTD, Zunyi 563000, Guizhou, China;
2. No. 106 Geological Team, Guizhou Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Zunyi 563000, Guizhou, Chian)

[Abstract] The formula for calculating active earth pressure in “technical code for building slope engineering” is lengthy and difficult to understand, so it is not easy to master. Based on the Coulomb’s earth pressure theory, the general analytical formula for the optimal calculation of active earth pressure is derived after considering the force between the wall and the fill behind the wall as the comprehensive internal friction angle. The results of calculation examples show that the results of active earth pressure calculated by the general analytical formula and the code formula are approximate; Under the same conditions, the earth pressure formula in the code can be derived from the general analytical formula. Compared with the standard formula, the general analytical formula has the characteristics of clear principle, simple formula, simple and fast calculation process, and the calculation accuracy can meet the engineering requirements, which has good application value in practical work.

[Key Words] Technical code for building slope engineering; Active earth pressure; Optimization; Coulomb’s earth pressure theory; Comprehensive internal friction angle