

地连墙槽壁稳定性三维模型的改进

李超

(上海岩土工程勘察设计研究院有限公司, 上海 200002)

【摘要】 针对现行槽壁稳定性研究的力学模型和计算方法之不足与缺陷,相应进行理论模型的修正和计算方法的改进,提出了改进抛物线柱体模型。基于极限平衡理论,建立目标函数,运用复合形法对其进行优化设计。运用工程实例,与原有计算方法进行了比较。

【关键词】 改进抛物线柱体模型;复合形优化方法;槽壁稳定性;地下连续墙

【中图分类号】 TP 393

Improvement on the Three-dimensional Model of the Stability of Slurry Trenches in Diaphragm Wall Engineering

Li Chao

(Shanghai Geotechnical Investigation & Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200002 China)

【Abstract】 Through modifying the current mechanical model and the current computational method of the stability of slurry trenches in diaphragm wall engineering, the improved parabolic cylinder model is put forward. The objective function based on the limit equilibrium theory is established and designed with the complex optimal method. The superiority of this method is proved by engineering practice.

【Key words】 the improved paracurve cylinder model; complex optimal method; stability of slurry trench; diaphragm wall

0 引言

地下连续墙作为基坑围护的一种重要形式,由于其墙体刚度大、整体性强,可逆作法施工等优点得到广泛应用。但是,地下连续墙在施工过程中常常发生槽壁坍塌现象。特别是在软弱疏松土层或含砂性夹层非稳定土层中,进行地下连续墙施工,槽壁坍塌现象更为严重。

槽壁稳定理论是地下连续墙施工工艺中一个传统而经典的技术课题。目前,地下连续墙槽壁稳定性分析的力学建模方法有以下3种:

- ①梅耶霍夫经验公式法;
- ②基于圆弧滑动破坏稳定系数法;
- ③三维模型分析法。

梅耶霍夫(G G Meyerhof)经验公式法是以确定开挖槽段的临界深度 H_{cr} 为研究目的,理论公式建立在槽壁失稳后土体发生楔形滑动的假设基础上,以开挖深度最大值评价槽壁安全与否的最不利情况,楔形滑动基于传统的朗肯土压力理论,计算结果保守且无法考虑优化设计目的。工程实际槽壁的失稳很少表现楔形滑动破坏。因此不能真实反映槽壁

的实际破坏情况。基于圆弧滑动破坏稳定系数法建立了槽壁圆弧滑动破坏模型,而忽略槽段的几何尺寸的影响,所以无法考虑土拱效应的影响。基于破坏面形状和考虑土拱效应双重要素的考虑,日本大林组技术研究所左藤宽、秋野矩之等首先提出了反映真实槽壁失稳破坏的三维破坏模型。由于槽壁稳定的机理十分复杂、至今仍无明确定论,三维分析法因更能反映槽壁失稳的真实破坏情况,因而得到了广泛的重视和应用。

另外,长期以来在研究地下连续墙槽壁稳定性时,通常只将场地土层性质、地下水位、泥浆重度、泥浆液面高度等几方面作为主要影响因素,事实上,影响槽壁稳定性的因素众多,并且各种因素之间又相互制约、耦合作用。

本文将简单回顾槽壁失稳三维分析法的研究状况,就现有的三维滑动模型进行修改,提出新型破坏体模型——改进抛物线柱体模型,对改进抛物线柱体模型进行几何参数计算和破坏体受力分析,着重在计算方法上做较大的变动和创新,引入不同于原抛物线柱体模型中的平衡思想,有机引入数学

优化分析思想——复合形法,综合考虑各种影响因素的联合作用下的相互关系。

1 三维滑动模型分析的简单回顾

现在三维滑动分析模型有半圆柱体模型和抛物线柱体模型两种。

1.1 半圆柱体模型法^[1]

日本大林组技术研究所左藤宽、秋野矩之等于1975年建立和推导出半圆柱体破坏模型,假设槽壁失稳后滑裂体形状为底部倾斜的半圆柱状(见图1),作用于滑裂体上的荷载有:滑裂体的自重力 W ,滑裂体范围的外荷载合力 P ,滑裂体垂直面上的粘聚力 c_1 ,滑裂体底斜面上的粘聚力 c_2 。滑裂体底斜面上正压力与摩擦力的合力 T (偏离内摩擦角 φ),地下水压力 P_w ,槽内的泥浆压力 P_f (见图1)。 h 、 L 分别为槽段开挖深度和长度, h_w 为地下水位埋深。基于滑裂面受力的极限平衡状态列出力的平衡方程式

$$\sin(\alpha - \varphi)(W + P - F_1) - F_2 \cos \varphi = (P_f - P_w) \cos(\alpha - \varphi) \quad (1)$$

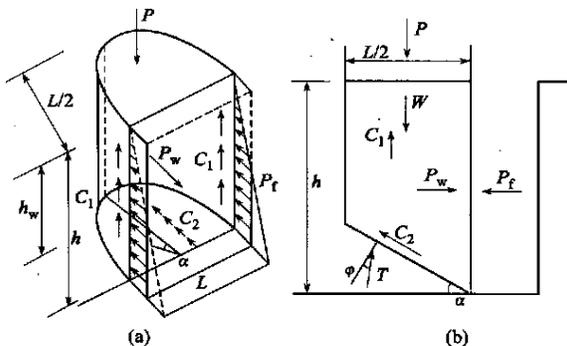


图1 半圆柱体模型

式中: F_1 为粘聚力 c_1 的合力,作用方向为竖向, F_2 粘聚力 c_2 的合力,作用方向沿底斜面,与水平面夹角为 α 。

1.2 抛物线柱体模型法^[2,3]

A·P·laskowski 针对地下连续墙工程的实际,提出了抛物线圆柱体模型,该模型滑裂体拱柱的投影曲线形状为抛物线,而非半圆柱体模型的半圆形。

抛物线 AOB 的方程(见图2)

$$y^2 = \frac{L^2}{4h}x \quad (2)$$

作用于滑裂体上的荷载有:滑裂体自重力 W ,滑裂体范围内的外荷载合力 P ,滑裂体垂直面上的粘聚力 c ,滑裂面的抗剪力 P_s ,滑裂面法向反力 N ,地下水压力 P_w ,槽内的泥浆压力 P_y 。其中, P_s 等于滑动面摩擦力与粘聚力之和,即 $P_s = N \tan \varphi + A_c c$ 。将以上

各力投影到滑动面上,得极限状态下的力系平衡方程

$$(W + P) \sin \alpha = (P_v - P_w) \cos \alpha + P_s \quad (3)$$

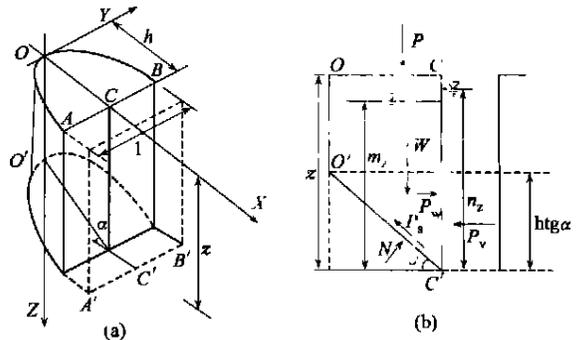


图2 抛物线柱体模型

1.3 现行三维分析模型的缺陷与不足

依据半圆柱体模型的计算结果将放大土拱效应的积极减压作用,即将常规主动土压力折减过多,这将导致护壁泥浆重度的设计值偏小;圆柱体模型和抛物线柱体模型均假设滑动面为与水平面成 α 倾角的平面,显然不符合地连墙槽壁破坏时土柱底部的实际情况,尤其是粘性土层,当平衡拱土柱随同槽壁向前产生位移时,由于受到底部地基的摩擦力和土体粘聚力的影响,柱段的底面将形成一曲面形的滑动面。

2 改进抛物线柱体模型的建立

根据现有模型的缺点与不足,在原有抛物线模型的基础上进行几何改进,由于几何修正带来的稳定计算方法上的变动,也是本文提出的改进抛物线柱体模型法的特色所在。

2.1 改进抛物线柱体模型几何改进

1)注意影响土拱效应的双重因素——土层性质和护壁泥浆性质,建立新型的抛物线函数关系式,以代替原抛物线柱体模型基于Protodyakonov土压理论的函数关系式。

2)认为改进的抛物线柱体模型的滑裂体底面将形成曲面形的滑动面,以代替原抛物线柱体模型的楔形滑动面的假设。

2.2 改进的抛物线柱体模型几何参数

由于对滑裂体的几何外形做一定的修正,采用圆弧滑动面代替原抛物线柱体模型的楔形滑动面,因而使数学处理过程复杂许多。以下是改进的抛物线柱体模型的几何参数的求解步序。

1)考虑影响土拱效应的双重因素——土层性质和泥浆性质,引用文献[4]中抛物线形式(见图3),

在坐标平面 xoz 中函数关系式如下

$$z^2 + \frac{b \tan \varphi}{\lambda} \left(x - \frac{b \lambda}{4 \tan \varphi} \right) = 0 \quad (4)$$

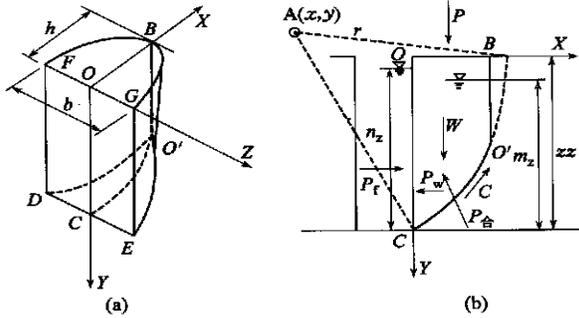


图3 改进抛物线柱体模型

式中： λ 为平衡拱上作用荷载不均匀性的修正系数，其值与土层性质(φ 值)和泥浆性质(泥浆塑性粘度 $P \cdot V$)有关，此系数折减了拱高大小，拱越高则减压作用越小，因而克服原模型过多放大土拱效应减压作用，使减压效应控制在一个合理的范围内。

2)滑裂体总体积采用二重积分法代替条分法等近似方法直接求解

$$V_{\text{体}} = 2 \iint y dx dz = 2 \int_{0 \leq z \leq \frac{b}{2}} \int_{0 \leq x \leq \frac{z \lambda}{b \tan \varphi}} \sqrt{r^2 - x^2} dx dz \quad (5)$$

3)地下水以上滑裂体体积

$$V_u = \frac{2}{3} bh(zz - m_z) \quad (6)$$

4)地下水以下滑裂体体积

$$V_D = V_{\text{体}} - V_u \quad (7)$$

5)滑裂体底面积(见图3)，滑裂体的底面积即为底部曲面滑动面 DEO' 的面积，滑动面 DEO' 在坐标平面 xoz 中的投影为由抛物线 FBG 与 Z 轴围成的面积

$$S_{\text{底}} = S_{DEO'} = 2 \int_{0 \leq z \leq \frac{b}{2}} \int_{0 \leq x \leq \frac{z \lambda}{b \tan \varphi}} \sqrt{1 + \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial z}\right)^2} dx dy \quad (8)$$

6)滑弧弦长 $\overline{O'C}$

$$\overline{O'C} = \sqrt{h^2 + (Y - zz)^2} \quad (9)$$

7)圆弧段 $O'C$ 对应圆心角 θ

$$\theta = 2 \arcsin \left(\frac{\overline{O'C}}{2R} \right) = 2 \arcsin \left(\frac{\sqrt{h^2 + (Y - zz)^2}}{2r} \right) \quad (10)$$

8)弦 $\overline{O'C}$ 与水平面夹角 β

$$\beta = \arctan \frac{zz - Y}{h} \quad (11)$$

由式(5)、式(8)展开后被积函数的式子相当复杂且存在无法用初等函数表示的原函数，因而引入数值积分法求解，基于复化梯形法思想，编写计算程序，据此求滑裂体的总体积。

2.3 改进的抛物线柱体模型受力分析

根据上述改进的抛物线柱体模型的假设条件，作用于滑裂体上的力有：滑裂体自重力 W ，土拱范围内的超载合力 P ，底部滑动面上的粘聚力 c ，圆弧滑动面上的法向力 N ，滑动面上的摩擦力 P_s ，地下水的压力 P_w ，护壁泥浆的压力 P_f (见图3)。这些力的计算公式如下。

1)滑裂体自重力 W

地下水位以上的土虽然处于毛细状态、但是仍按照天然重度 γ 计算。

地下水位以下土的重度取有效重度 $\gamma - \gamma_w$ ，

$$W = V_u \gamma + V_D (\gamma - \gamma_w) \quad (12)$$

2)护壁泥浆压力 P_f

现行槽壁稳定性分析模型中，将护壁泥浆对槽壁的支撑作用均无一例外地假设为静水压力加载到模型上。但泥浆是具有触变性的特殊流体材料，对维持槽壁稳定不仅只起静态液压的作用。根据Bishop(1952)推算出的分析结果，对于宽度为 b 的深槽

$$P_f = \int_0^{n_z} \sigma_x dy = \frac{1}{2} \gamma_f n_z^2 + \frac{C_f n_z^2}{b} + \pi C_f \frac{n_z}{2} \quad (13)$$

式中： n_z 为泥浆液面到槽底的高度。

在宽度为 b 的槽壁面上，护壁泥浆作用力的合力为 $P_{\text{泥浆}} = P_f \times b$ ，方向为水平向。

3)地下水压力 P_w

采用传统的“水土分算”方法，将地下水单独抽出来作为外荷载施加于滑裂体上。由于挖槽施工过程较短，所以不考虑渗流力作用。

$$P_w \cdot b = \frac{1}{2} \gamma_w \cdot m_z^2 \cdot b \quad (14)$$

4)土拱范围内超载合力 P

拟将超载考虑力集中力且竖直向下作用，并假定力的作用中心距离槽壁面 $h/2$ ， h 为抛物线平衡拱的拱高。

5)底部滑动面上粘聚力 c

采用泰勒(Taylor, 1948)摩擦圆法^[5]寻求滑裂体底部滑动面的受力极限平衡关系，将底部滑动面上的抗剪力拆分成摩擦力 S_f 与粘聚力 c 。其中，粘聚力的合力 C 为单位粘聚力 c 与底部滑动面面积

$S_{底}$ 的乘积。

$$C = c \cdot S_{底} = c \cdot 2 \int_0^{\frac{b}{2}} r \cdot \arcsin \left[\left(h - \frac{z^2 \lambda}{b \tan \varphi} \right) \cdot \frac{1}{r} \right] dz \quad (15)$$

粘聚力合力 C 的作用方向与弦 CO' 平行。从滑弧转动圆心 O 到粘聚力合力 C 的力矩臂按下式求得,

$$x = r \frac{O'C}{O'C} = r^2 \frac{2 \arcsin \left[\frac{\sqrt{h^2 + (Y - zz)^2}}{2r} \right]}{\sqrt{h^2 + (Y - zz)^2}} \quad (16)$$

式中: R 为底面滑弧对应的滑动圆的半径。

6) 滑动面上法向力 N 和摩擦力 $P_{摩}$ 之合力 $P_{合}$

根据摩擦圆法原理, 合力 $P_{合}$ 的方向与半径为 $r \sin \varphi$ 的摩擦圆相切, 即合力 $P_{合}$ 到滑动面圆 A 的距离 $r \sin \varphi$ 。

2.4 基于摩擦圆法建立模型力学平衡关系

以圆弧滑动面的圆心 A 为力矩转动中心, 在极限平衡状态下, 可以针对改进的抛物线柱体模型建立如下三个力学平衡关系式,

$$\begin{cases} \sum X = 0 \\ \sum Y = 0 \\ \sum M_0 = 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} P_{泥} - P_{水} + C \cdot \cos \beta = P_{合} \cdot \sin \gamma \\ W + P - C \cdot \sin \beta = P_{合} \cdot \cos \gamma \\ M_1 + M_2 + M_3 = M_4 + M_5 + M_6 \end{cases} \quad (17)$$

式中: M_1 为滑动体自重力产生的力矩, M_2 为地面静超载产生的力矩, M_3 为地下水静水压力产生的力矩, M_4 为沿圆弧滑动面由土的粘聚力产生的抵抗矩, M_5 为 $P_{合}$ 产生的抵抗矩, M_6 为护壁泥浆压力产生的抵抗矩, β 为弦 OC 与水平面的夹角, γ 为 $P_{合}$ 与垂直面的夹角(中间参量)。

2.5 建立优化目标函数式

针对模型受力极限平衡关系式(17), 通过一定的解析变换, 即可导出欲求未知量的函数式, 作为优化分析的目标函数。

(1) 泥浆最小重度 γ_f 目标函数, 见下式

$$\gamma_f = \frac{-(K_1 - K_3) - \sqrt{(K_1 - K_3)^2 - 4(K_2 - K_4)(l_6^2 - r^2 \sin^2 \varphi)}}{2(l_6^2 - r^2 \sin^2 \varphi) \cdot b} - \frac{C_f \cdot n_z^2}{b} - \pi \frac{C_f \cdot n_z}{2} \frac{2}{n_z} \quad (18)$$

(2) 最小安全系数 F_s 目标函数, 见下式

$$F_s = \frac{P_{泥} \cdot (zz - n_z/3 - y) + P_{合} \cdot r \sin \varphi + C \cdot x}{(W + P) \cdot (-x + h) + P_{水} \cdot (zz - m_z/3 - y)} \quad (19)$$

$$\text{式中: } K_1 = -2l_6[(W + P)l_1 + P_{水}l_3 - Cx] \quad (20)$$

$$K_2 = [(W + P)l_1 + P_{水}l_3 - Cx]^2 \quad (21)$$

$$K_3 = 2(C \cos \beta - P_{水})r^2 \sin^2 \varphi \quad (22)$$

$$K_4 = [(C \cos \beta - P_{水})^2 + (W + P - C \sin \beta)]r^2 \sin^2 \varphi \quad (23)$$

下边将对式(18)、式(19)两函数式进行优化分析。

3 槽壁稳定性优化分析

工程设计优化分析的一般思想是在确保工程安全可靠的前提下, 以工程造价最低作为最优设计方案, 以目标函数中因变量的变化而带来结果的变化作为分析途径, 在所有变量约束条件范围内寻求设计上的优化。

本文引入复形法优化分析思想^[6,7], 在最初的多个由优化参量组成的初始点而组成的复形中, 在被优化参量的边界约束条件和不等式约束条件下不断进行迭代, 从两个不同角度, 即最小泥浆重度 γ_f 和最小安全系数 F_s , 研究槽壁的稳定性问题, 无限逼近最优值, 直到找出目标函数的总体极值。

3.1 优化求解最小泥浆重度和安全系数

在式(18)中, 泥浆重度 γ_f 是槽壁失稳滑动体几何参数 x 、 y 、 zz 、 b 的函数(见图3), 其中 x 、 y 为图示坐标系下滑动中心纵横坐标, zz 为滑裂体高度, b 为开挖宽度。四个参数皆为独立参数, 无关联性。即有 $\gamma_f = \gamma_f(x, y, zz, b)$, 给定一数组 (x_i, y_i, zz_i, b_i) , 就可以计算出一个与之对应的 γ_{fi} 值, γ_{fi} 的物理含义: 当实际的泥浆重度 γ_0 以小于 γ_{fi} 时, 参数 (x_i, y_i, zz_i, b_i) 所对应的假定危险滑动面将发生破坏。现在, 假想有很多个危险面(设有 n 个危险面), 基于求泥浆重度的目标函数式就可以算出 n 个不同的 γ_{fi} ($i=1, 2, 3, \dots, n$), 若使每个假想的危险面均不发生破坏, 则实际的泥浆重度 γ_0 必须大于所有的 γ_{fi} , 即 $\gamma_0 = \text{MAX}(\gamma_{f1}, \gamma_{f2}, \gamma_{f3}, \dots, \gamma_{fi})$ 。显然, 最大值 γ_0 对应的 x_0, y_0, zz_0, b_0 就是最危险的滑动体参数。而目标函数极其复杂, 复形法作为优化分析方法中的直接法, 可以直接代入优化参量求解原问题, 将原问题转化成沿着一系列可行且可用的方向进行一维搜索。各个优化参量 (x, y, zz, b) 将被不等式约束条件和边界约束条件限制于各自的定义域内。

优化分析式(19), 求最小安全系数。

4 算例

针对上海地区的软弱粘性土地基条件, 基于算例, 比较改进的抛物线柱体模型的复形优化分析法和现行的抛物线柱体模型法、半圆柱模型法的计算

结果,对新模型计算方法进行评价。

某地下连续墙工程的设计深度为 $z_z = 30$ m, 槽段的设计宽度为 $b = 6$ m, 地基土的平均重度为 $\gamma = 18$ kN/m³、粘聚力 $c = 10.7$ kPa、内摩擦角为 $\varphi = 14^\circ$ 、无侧限抗压强度 $q_u = 21.37$ kPa, 地下水位的埋深 $h_w = 1$ m, 地面超载为 $q = 40$ kN/m²。为了保证开挖施工过程中槽壁的稳定性, 试求护壁泥浆重度。

基于本文方法算出的最小泥浆重度 γ_{\min} 均大于现行的抛物线柱体模型法、半圆柱模型法的计算结果(见表1)。因此, 在算例给定的条件下, 若按照现行的抛物线柱体模型法、半圆柱模型法进行设计, 可能出现危险。所以改进的抛物线柱体模型的复形优化分析法应更适用于软土地基中地下连续墙槽壁稳定性分析, 设计安全度较其他方法高。

表1 计算结果对比一览表

计算方法	最小泥浆重度 (kN·m ⁻³)	滑动体厚度/m	滑动面倾角/(°)	滑动体高度/m
半圆柱模型法	10.31	3.0	78.0	30.0
抛物线柱体模型法	10.44	4.0	59.0	30.0
本文计算法	10.77	4.0	57.35	30.0

算例中固定了开挖宽度 b , 所以只有三个参数参与优化, 因为开挖宽度 b 越小, 土拱效应作用越强, 主动土压力降低效果越明显, 因而护壁所需的最小泥浆重度 γ_{\min} 便越小, 即若 b 参与优化, 最终肯定取所给范围的最小值 b_{\min} 。算例是固定开挖宽度时对应的最小泥浆重度, 严格意义上算是局部最小泥浆重度。

5 结论

1) 抛物线柱体模型法得出的结果表明, 滑动面倾角 β 较缓、滑动体厚度 h 较大; 半圆柱体模型法得出结果表明, 滑动面倾角 β 较陡、滑动体厚度较小; 本论文方法的结果介于以上两种方法计算结果之间, 具有良好的调和性。

2) 以最小泥浆重度 γ_{\min} 为优化目标, 通过四个方向(x, y, z, b) 的搜索, 发现开挖宽度 b 为其设计范围的最小值 b_{\max} , 而破坏体高度 z_z 并非开挖最大深度, 而在整个设计高度的中下部。由此可见, 应该在满足约束条件的合理范围内首先确定最优开挖宽度 b , 然后进行全局优化, 方才能够得到设计上的

最优值, 即全局意义上的最小泥浆重度 γ_{\min} , 而非局部最小值。

参考文献

- 1 夏明耀. 地下连续墙泥浆槽壁稳定分析. 人防科技, 1985(1): 10~21
- 2 刘建航, 候学渊. 基坑工程手册. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997. 443~445
- 3 p p Xanthakos. Slurry Walls as Structural System. New York. 1994. 52~96
- 4 顾念慈. 挡土墙土压力计算. 北京: 中国建材工业出版社, 2001. 20~42
- 5 胡中雄. 土力学与环境土工学. 上海: 同济大学出版社, 1997. 270~290
- 6 王光远, 董明耀. 结构优化设计. 北京: 高等教育出版社, 1987. 45~55
- 7 欧海龙, 李向真. 多层复形法在结构优化中的程序设计. 世界地震工程. 2000, 16(4): 113~117

收稿日期 2004-06-21