

刚性挡土墙的水平位移计算

刘忠玉¹,崔国游¹,宋聚奎²,李新艳³

(1. 郑州工业大学土木建筑工程学院,河南 郑州 450002;2. 郑州市燃气有限公司,河南 郑州 450006;
3. 郑州市中原区市政设施管理所,河南 郑州 450007)

摘 要:通过分析土体与水泥土搅拌桩挡墙之间的相互作用,提出一种计算其水平位移的近似方法.在墙宽与墙高之比较小时,视其为刚体,并用“ m ”法确定墙两侧土体的弹簧刚度,同时考虑墙重与墙底土的抗剪和抗倾覆作用.利用该方法,探讨了水平位移与开挖深度的关系,同时可得到墙两侧土体的屈服范围以及所受的实际土压力,据此可判断墙体的稳定性.

关键词:水泥土搅拌桩;刚性挡墙;水平位移;土压力

中图分类号:TU 476. + 4 文献标识码:A

水泥土搅拌桩用作地下临时挡土结构时,通常是按重力式挡土墙设计.它主要用于软土中,若对其水平位移不加控制,会严重影响到基坑临近建筑物、地下管线和道路的安全,甚至导致坍塌倾覆等事故.因此越来越多的人致力于寻找计算其位移的实用方法.文献[1~3]把它视作一竖放的弹性地基梁,开挖侧在开挖面以下土体对桩起的支撑作用用一系列弹簧来描述,非开挖侧作用以主动土压力.但是由于水泥土搅拌桩挡墙的墙宽与桩长之比往往小于 $5^{[4]}$,所以把水泥土搅拌桩挡墙视作一般意义上的弹性梁值得商榷.因此,文献[5]引进了厚板理论,而文献[6]则把其位移分为刚性位移和弹性挠曲两部分,不过没有考虑开挖侧开挖面以下土的屈服.

实际上,墙两侧的土体并非完全处于屈服状态或弹性状态,土体对墙的抗力大小及分布和墙的位移有关.众所周知,当墙静止时,墙所受的土体的抗力为静止土压力;当墙向开挖侧移动时,非开挖侧土体由于拉伸对墙的抗力随之减小,同时开挖侧土体因压缩对墙的抗力逐渐增加.当墙面某点的位移较小时,该点土体处于弹性状态,用弹簧来表示,其弹簧刚度可用“ m ”法计算,当墙面某点的位移较大时,该点土体才可能处于屈服状态,即土体对墙的抗力在非开挖侧减小到主动土压

力,在开挖侧增大到被动土压力.所以非开挖侧土体的抗力全部用主动土压力值得商讨.本文认为还应同时考虑墙体与墙底土的相互作用.因此在平面应变假定下,本文提出一种计算模型,忽略开挖引起的土体的回弹,把水泥土搅拌桩挡墙看作刚体,可近似得到其水平位移,同时可得到墙两侧土体的屈服范围,由此可判别墙体的稳定性.

1 计算模型

计算简图如图 1 所示:挡墙两侧土体与墙的相互作用用一系列弹簧来代替,非开挖侧和开挖侧的土弹簧刚度分别为 $k_a(z)$ 或 $k_p(z)$ (下标 a 和 p 分别表示非开挖侧和开挖侧的参数,下同), W 为墙体自重, T 为墙底土对墙的抗剪力, $p(x)$ 为墙底土对墙的竖向支持力, H 和 h 分别为桩长和开挖面以下桩长, B 为墙宽.为计算方便,取墙底中点为坐标原点, z 轴正方向向上.

1.1 墙两侧土体对墙的作用力分布

当墙静止时,土体对墙的作用力为静止土压力,可按下式计算

$$\begin{aligned} p_{0a}(z) &= K_{0a}(z) \cdot (q + \sigma_z(z)) = (1 - \sin(\varphi_a(z))) \cdot (q + \sigma_z(z)); \quad (1a) \\ p_{0a}(z) &= K_{0a}(z) \cdot \sigma_z(z) = (1 - \end{aligned}$$

$$\sin(\varphi_p(z)) \cdot \sigma_z(z), \quad (1b)$$

式中: q 为地面荷载; $\sigma_z(z)$ 为高程 z 处土体的竖向自重应力; $\varphi(z)$ 为高程 z 处土体的内摩擦角。

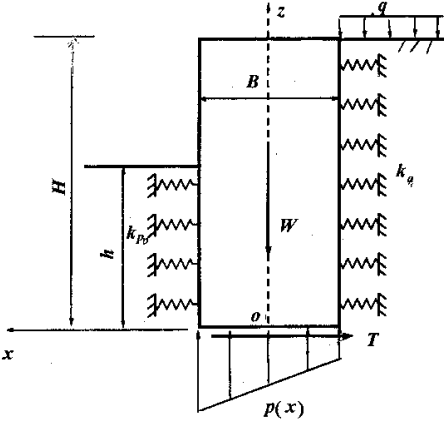


图1 计算简图

当墙向开挖侧产生较小位移时,土体处于弹性状态,墙和土体之间的相互作用力用弹簧表示,而弹簧刚度与该点的深度及土性有关,假定可用“ m ”法计算,即

$$k_a(z) = m_a(H - z); \quad (2a)$$

$$k_p(z) = m_p(h - z). \quad (2b)$$

设墙底中点的水平位移为 δ , 墙的转角为 θ , 则墙面某点的刚性位移近似为

$$u(z) = \delta + \theta \cdot z, \quad (3)$$

则土体对墙的抗力为

$$s_a(z) = p_{0a}(z) - k_a(z) \cdot u(z); \quad (4a)$$

$$s_p(z) = p_{0p}(z) + k_p(z) \cdot u(z). \quad (4b)$$

当墙向开挖侧产生较大位移时,土体将屈服,此时作用在挡土墙两侧的土压力分别为主动土压力 p_a 和被动土压力 p_p ,一般按朗肯土压力理论计算:

$$p_a(z) = (q + \sigma_z(z)) \cdot K_a(z) - 2c_a(z) \cdot \sqrt{K_a(z)}; \quad (5a)$$

$$p_p(z) = \sigma_z(z) \cdot K_p(z) + 2c_p(z) \cdot \sqrt{K_p(z)}, \quad (5b)$$

$$K_a(z) = \tan^2[\pi/2 - \varphi_a(z)/2]; \quad (6a)$$

$$K_p(z) = \tan^2[\pi/2 + \varphi_p(z)/2]. \quad (6b)$$

式中, $c(z)$ 为高程 z 处土体的粘聚力。但朗肯理论假定墙与土体之间没有摩擦力,因此按上式算得的主动土压力偏大,被动土压力偏小,实践中往往给算得的主动土压力乘以 0.7~1 的折减系数,而被动土压力不予修正^[7]。这样按式(4a)(4b)计算土体对墙的作用力时应加下述限制:

$$s_a(z) = p_a(z), \text{ 当 } s_a(z) \leq p_a(z) \text{ 时}, \quad (7a)$$

$$s_p(z) = p_p(z), \text{ 当 } s_p(z) \geq p_p(z) \text{ 时}. \quad (7b)$$

1.2 墙底土与墙的相互作用

假定墙底土体与墙的竖向相互作用力 $p(x)$ 符合文克勒假定,基床系数设为 k_v ,同时假定墙体均匀。当墙静止不动时, $p(x)$ 可认为均匀分布:

$$p(x) = W/B. \quad (8)$$

当墙转动 θ 角时, $p(x)$ 为直线分布:

$$p(x) = W/B + k_v \cdot \theta \cdot x. \quad (9)$$

墙底土体与墙之间的摩擦力 T 也与二者之间的相对水平位移 δ 有关, δ 越大, T 越大,二者可假定为正比例关系。当相对水平位移达到一定值 δ_m 时,摩擦力达到极值 T_{\max} 。所以:

$$T(\delta) = \begin{cases} \delta/\delta_m \cdot T_{\max}, & \delta < \delta_m \\ T_{\max}, & \delta \geq \delta_m \end{cases}, \quad (10)$$

最大摩擦力可按下式求得

$$T_{\max} = W\mu, \quad (11)$$

其中, μ 为墙底土体与墙之间的摩擦系数。文献[6]建议按下式计算 T_{\max} :

$$T_{\max} = c_0 \cdot B + W \tan \varphi_0. \quad (11)$$

式中: c_0 和 φ_0 分别为墙底土的粘聚力和内摩擦角。

1.3 平衡方程的建立与位移求解

根据墙体水平力和力矩的平衡可得:

$$\int_0^H s_a(z) dz = \int_0^h s_p(z) dz + T(\delta); \quad (12a)$$

$$\int_0^H s_a(z) \cdot z dz = \int_0^h s_p(z) \cdot z dz + M(\theta), \quad (12b)$$

式中: $M(\theta)$ 为墙体自重和墙底土的支持力对墙底中点的力矩:

$$M(\theta) = k_v B^3 \theta / 12, \quad (13)$$

事实上,式(12a)和式(12b)中仅有未知量 θ 和 δ 。将式(3)(4a)和式(4b)依次代入,且考虑到限制条件式(7a)和式(7b),对式(12a)和式(12b)的相关项积分后,该二式可化简为

$$\begin{cases} A_1 \delta + B_1 \theta + C_1 = 0 \\ A_2 \delta + B_2 \theta + C_2 = 0 \end{cases}. \quad (14)$$

将墙两侧土体分别分为 n_a 和 n_p 层,其中,屈服的土层数分别为 n_{as} 和 n_{ps} ,弹性土层数分别为 n_{ae} 和 n_{pe} ,式(14)中的系数为:

$$\begin{aligned} A_1 &= \sum_{i \in n_{ae}} m_{ai}(H - z_{ai}) dz_{ai} + \sum_{i \in n_{pe}} m_{pi}(h - z_{pi}) dz_{pi}; \\ B_1 &= \sum_{i \in n_{ae}} m_{ai}(H - z_{ai}) z_{ai} dz_{ai} + \end{aligned} \quad (15a)$$

$$\sum_{i \in n_{pe}} m_{pi} (h - z_{pi}) z_{pi} dz_{pi} ; \quad (15b)$$

$$C_1 = \sum_{i \in n_{ps}} p_{pi} dz_{pi} - \sum_{i \in n_{as}} p_{ai} dz_{ai} + T(\delta) + \sum_{i \in n_{pe}} p_{0pi} dz_{pi} - \sum_{i \in n_{ae}} p_{0ai} dz_{ai} ; \quad (15c)$$

$$A_2 = B_1 ; \quad (15d)$$

$$B_2 = \sum_{i \in n_{ae}} m_{ai} (H - z_{ai}) z_{ai}^2 dz_{ai} + \sum_{i \in n_{pe}} m_{pi} (h - z_{pi}) z_{pi}^2 dz_{pi} + k_v B^2 / 12 ; \quad (15e)$$

$$C_2 = \sum_{i \in n_{ps}} p_{pi} z_{pi} dz_{pi} - \sum_{i \in n_{as}} p_{ai} z_{ai} dz_{ai} + \sum_{i \in n_{pe}} p_{0pi} z_{pi} dz_{pi} - \sum_{i \in n_{ae}} p_{0ai} z_{ai} dz_{ai} . \quad (15f)$$

由于事先不知道墙两侧土体屈服的具体范围,因而对式(14)可用迭代法求得 δ 和 θ ,然后可由式(4)(5)(7)计算出土体对墙的作用力,并可判断出屈服范围.由此,可判定其稳定性和设计的合理性.很明显,当挡墙两侧土体大部分屈服后,挡墙将丧失其稳定性.

2 算例

以文献[8]中的某水泥土挡墙为例,墙深8 m,宽3.7 m,坑深4.5 m,场地土层的平均重度为18.3 kN/m³,抗剪强度指标取厚度加权平均值,内摩擦角为18.9°,内聚力为7.1 kPa, $m_a = m_p$,取为8000 kN/m⁴,地面载荷取10 kPa,实测桩顶最大位移为10~12 mm^[8].文献[8]在不考虑桩顶的冠梁效应时算得桩顶最大位移为29.0 mm,而采用文献[1]的方法,算得桩顶最大位移为20.0 mm.按本文方法,取 $k_v = h \cdot m_p = 28000$ kN/m⁴, $\delta_m = 6$ mm, $q = 10$ kPa,主动土压力折减系数取0.8,算得桩顶最大位移为15.1 mm,与实测更加接近,这说明本文方法的有效性.

另外,按本文方法研究了墙顶水平位移随开挖深度的变化规律,如图2所示.从图中可看出,当开挖深度较小(小于2.1 m)时,二者基本上呈线性变化,这说明墙两侧土体处于弹性状态.随着开挖深度的增加,二者呈非线性变化,这意味着墙侧土体(主要在非开挖侧)开始逐渐转为屈服状态.当开挖一定深度(4.8 m)后,曲线变陡,此时非开挖侧大部分土体已处于屈服状态,开挖侧土体也较快地转为屈服状态.另外可由图3的基坑深度4.5 m时墙两侧所受土压力可看出:非开挖侧高程0.24 m以上土体已处于屈服状态,而开挖侧的土体仍未屈服,仅高程2 m附近土体接近屈服,

总体来说此时挡墙是稳定的.

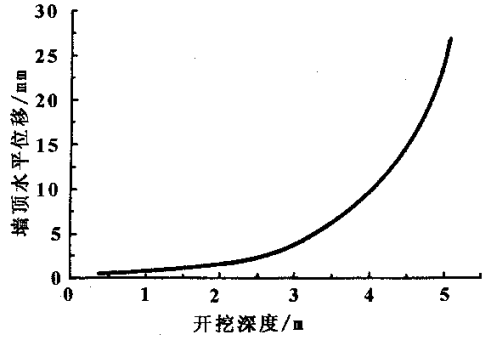


图2 基坑开挖深度与墙顶水平位移的关系

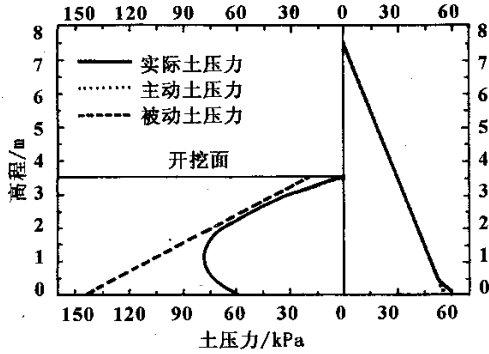


图3 坑深4.5 m时挡墙两侧的土压力

3 结束语

本文通过对土体与墙体相互作用的讨论,给出一种计算刚性挡墙水平位移的近似方法,可以同时得到墙两侧土体的屈服范围、实际土压力的分布情况,由墙两侧土体的屈服情况即可判定其稳定性.

参考文献:

- [1] 蔡伟铭.水泥土挡土结构水平位移的计算[A].高大钊.软土地基理论与实践[C].北京:中国建筑工程工业出版社,1992.132-136.
- [2] 孙介华.关于水泥土搅拌桩挡墙水平位移的分析与控制[J].水文地质工程地质,1998(5):58-59.
- [3] 杨光华.深层搅拌桩等嵌入式重力挡土结构稳定与变形的计算[J].岩土工程学报,1996,18(4):91-94.
- [4] 史佩栋.搅拌桩挡墙的设计与施工[A].刘建航,侯学渊.基坑工程手册[C].北京:中国建筑工程出版社,1997.603-660.
- [5] 高文华.基于Mindlin板理论的深层搅拌桩墙体受力变形的空间效应[J].土木工程学报,1999,32(5):71-75.
- [6] 冯又全,杨敏,熊巨华.水泥土复合式围护结构的位移内力计算与性状分析[J].岩土工程技术,1999(3):3-6.

- [7] 方小兵. 深层水泥土搅拌桩支护墙设计计算探讨 [J]. 工程力学, 1998(增刊): 561 - 564. 土挡墙变形计算方法[J]. 岩土力学, 1999, 20(1): 84 - 86.
- [8] 熊巨华, 裴健勇, 杨 敏. 考虑桩顶冠梁效应的水泥

Horizontal Displacement of Rigid Retaining Wall

LIU Zhong - yu¹, CUI Guo - you¹, SONG Ju - kui², LI Xin - yan³

(1. College of Civil & Building Engineering, Zhengzhou University of Technology, Zhengzhou 450002, China; 2. Zhengzhou Gas Limited Company, Zhengzhou 450006, China; 3. The Municipal Engineering Facilities Management House of Zhongyuan District, Zhengzhou 450007, China)

Abstract An approximate method to compute the horizontal displacement of cement - soil retaining wall is presented by analyzing the interaction between soil mass and the wall. The wall can be regarded as a rigid body if the ratio of its width to height is very small. The stiffness of soil spring is determined by “*m*” method, and the effect of shearing and overturning resistance of the wall weight and the soil below the wall is taken into account at the same time in this paper. By this method, the relation between the horizontal displacement and pit depth is discussed, and the yield scope of soil and the real soil pressure are simultaneously obtained. Accordingly, its stability can be judged.

Key words mixing cement column; rigid retaining wall; horizontal displacement; soil pressure