

下圆上方型悬臂式填方路基抗滑桩受力机理及应用分析

李振宇 谢鹏 刘圆圆

(湖南科技大学, 湖南湘潭 411201)

摘要:我国地形复杂多样,山川起伏跌宕,使多种工程建设中出现很多边坡治理、路基填挖方支挡的问题,我国在处理此类工程问题中积累了丰富的经验。人们发现在掌握滑坡体滑动方向的前提下,矩形截面抗滑桩所起到的作用效果要远远超过圆形截面抗滑桩。以往都是采用人工挖孔成桩的施工方式,施工环境恶劣、劳动强度大,施工速度慢,而且危险性极强,安全系数低,无法切实保障施工人员的生命安全,可见剔除传统的人工开挖施工方式,采用机械式钻孔开挖方式刻不容缓,对加快工程施工速度、保障施工人员的生命安全具有至关重要的作用。本文主要针对下圆上方型悬臂式填方路基抗滑桩受力机理及应用情况进行分析,希望可以为相关工程提供参考与借鉴。

关键词:下圆上方型悬臂式抗滑桩;填方路基;受力机理

中图分类号:U41 **文献标识码:**A

下圆上方型悬臂式填方路基抗滑桩具有受力合理的特点,用于工程实践中治理边坡能够显著加快施工速度,确保施工人员的生命安全,进而提高建筑企业的经济效益和社会效益。我国目前正处在公路建设的高峰时期,这种新型的抗滑桩应用前景非常广阔,但是由于下圆上方型悬臂式变截面抗滑桩的形式比较新颖,桩身受力复杂,有关其受力机理的分析和计算还未完成。在当前设计阶段中主要采用计算上段方桩等截面抗滑桩特性的方式,造成资源浪费、抗滑桩中出现很多不利因素。因此,本文基于传统抗滑桩计算理论,对下圆上方型悬臂式填方路基抗滑桩在水平荷载作用下的受力机理进行分析,以此来确保作业环境的安全,保障作业人员的人身安全。

1 下圆上方型悬臂式填方路基抗滑桩受力机理和计算方法分析

1.1 悬臂式抗滑桩计算方法概述

滑坡体在自身重力的影响下,会出现严重向下滑动的趋势,利用抗滑桩则可以将滑坡体所产生的推力传送到底层下较为稳定的土体中,利用抗滑桩桩前土体被动土压力来对滑坡的推力进行抵抗。

1.1.1 计算基本假定。(1)抗滑桩桩身可被看作一个弹性体,假定抗滑桩的横截面无论是在任何结构受力之前,还是在受力之后,都呈平面形,即桩身应变呈二维变化。(2)抗滑桩悬臂段内所包含的滑坡推力、主动土压力都可以进行简化处理,后期则需要根据具体情况进行相应的代换。(3)忽略在施工过程中因为其他不可预见因素对抗滑桩桩身结构造成的影响。(4)抗滑桩锚

固段从始至终都与土体紧密结合,土的应力、应变关系都非常符合文克尔假定。(5)只对桩身结构的受力情况进行分析,不对桩间土拱等其他的作用进行考虑。

1.1.2 桩的计算宽度及变形系数。在横向作用力下,桩与土体之间所存在的相互作用是一个非常复杂的空间问题。根据相关文献记载,采用转换桩自身实际受力宽度的方式,可以起到简化计算平面受力状态流程的作用。有试验表明,因为圆形截面桩和矩形截面桩的几何结构各不相同,受水平力作用的影响,两种桩型的计算转换系数设定为0.9。

$$\text{对锚固段圆桩 } B_p = 0.9(d+1) \quad (1)$$

$$\text{对锚固段方桩 } B_p = b+1 \quad (2)$$

式中, B_p 表示桩的计算宽度, d 表示圆的直径,单位为m; b 表示矩形桩受力面的边长,单位为m;

变截面抗滑桩自身的变形系数,按照 m 方式计算为

$$a = \left(\frac{mB_p}{EI} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (3)$$

式中, m 表示地基系数的比例系数,单位为 t/m^4 ; I 表示桩截面惯性矩,单位为 m^4 ; E 表示弹性模量,单位为 t/m^2 。

1.2 桩身力计算

1.2.1 变截面抗滑桩受荷段内力和变形计算

将下圆上方型悬臂式填方路基抗滑桩的变截面切开,单独对悬臂段的具体受力情况进行分析、计算。

首先,需要对荷段延桩长内的线分布荷载 q_0 情况进行确定。根据《铁路路基支挡结构设计规

范》^[1]中的相关内容,利用传递系数的方式来加强对滑坡下滑力 E_p 的计算,均布荷载公式为

$$q_0 = \frac{2Ep \times e}{h_1} \quad (4)$$

式中, e 表示抗滑桩的间距,单位为m; q_0 表示变截面位置上均匀分布的荷载集度,单位为kN/m; h_1 表示下圆上方型悬臂的段总长度,单位为m。其次,需要对受荷段桩身内在结构的承受力进行确定。距离桩顶 y ($y \leq h$)的位置,下圆上方型抗滑桩悬臂段中任意选取一个截面的剪力 $Q(y)$ 和弯矩 $M(y)$ 的公式分别为

$$Q(y) = \frac{q_0 y^2}{2h_1} \quad (5)$$

$$M(y) = \frac{q_0 y^3}{6h_1} \quad (6)$$

抗滑桩滑动面处包括方桩桩底、圆桩桩顶,其具体桩身的弯矩设为 M ,剪力设为 Q ,即, $y=h$ 的时候,公式表示为

$$Q_0 = \frac{q_0 h_1}{2} \quad (7)$$

$$M_0 = \frac{q_0 h_1^2}{6} \quad (8)$$

最后,分别需要对截面抗滑桩悬臂段的位移情况和转角度进行计算。先不对锚固段桩身变形的情况进行分析,仅单一研究悬臂段变形的情况,通过借助材料力学的计算方式和梁的挠曲方程可以直接得出抗滑桩悬臂段的变形方程。

$$\frac{d^2 x}{dy^2} = \frac{M(y)}{EI} \quad (9)$$

通过对微分方程式求解,可以得出悬臂段任意一个位置的桩身水平位移设定为 xy ,具体公式为 $xy = f(y) = -\frac{1}{EI} \int [\int (M(y) \times dy - C_1 y - C_2]$ (10)

根据抗滑桩悬臂段桩底所带有的约束条件可以直接得出:当 $y=h$ 的时候, $f(h_1) = 0$, $\varphi_{h1} = f'(h_1) = 0$,根据其公式可以直接将悬臂段任意位置的水平位移 xy 和转角 φ_y 的结果准确地计算出来,公式如下:

$$x_y = \frac{q_0}{120EIh} (y^5 - 5h_1^4 y + 4h_1^5) \quad (11)$$

$$\varphi_y = f(y)' = \frac{q_0}{24EIh} (y^4 - h_1^4) \quad (12)$$

利用叠加原理,发现抗滑桩桩悬臂段位移 x 是抗滑桩悬臂段所计算的位移 xy 与锚固段(圆桩)计算得出锚固段桩顶位移 x 的和,具体公式如下:

$$\begin{aligned} x_n &= x_y + x_1 \\ &= x_y + x_A + \varphi_A (h_1 - y) \\ &= \frac{q_0}{120EIh} (y^5 - 5h_1^4 y + 4h_1^5) + x_A + \varphi_A (h_1 - y) \end{aligned} \quad (13)$$

同理可以直接得出:

$$\begin{aligned} \varphi_n &= \varphi_y + \varphi_A \\ &= f(y)' + \varphi_A \\ &= \frac{q_0}{24EIh} (y^4 - h_1^4) + \varphi_A \end{aligned} \quad (14)$$

式中, φ_A 表示为锚固段桩顶转角,单位为rad; x_A 表示为锚固段桩顶位移,单位为m。

根据上述公式,可以直接得出悬臂式变截面抗滑桩桩顶的位移 x_p 、桩顶转角 φ_p ,具体公式如下:

$$x_p = x_A + h_1 \varphi_A + x_1 + h_1 \varphi_A + \frac{q_0 h_1^4}{30EI} \quad (15)$$

$$\varphi_p = \varphi_A + \varphi_1 = \varphi_A + \frac{q_0 h_1^3}{24EI} \quad (16)$$

1.2.2 锚固段计算

取抗滑桩锚固段进行单独分析,桩前受被动土压力,桩顶在悬臂段作用弯矩与剪力的作用下,桩底需要根据不同约束情况完成具体化的分析^[2]。

假设地基系数变化为一个三角形,抗滑桩桩身将其作为一个弹性体,通过利用 m 法进行求解,变截面的抗滑桩在两种压力的作用下会发生挠曲变形的情况,这两种压力分别为坡推力和锚固段桩前被动土压力。下圆上方型悬臂式变截面抗滑桩锚固段计算过程中通常都是利用弹性地基梁的理论知识进行计算,在计算的基础上在联合材料力学进行求解:

$$EI_0 \frac{d^4 x}{dy^4} + p = 0 \quad (17)$$

公式中 I 表示为截面惯性矩,由于锚固段桩截面的形状是一个圆形,直径为 d ,因此 $I_0 = \frac{\pi d^4}{64}$; p 表示为锚固段桩前的被动土压力。套用 $B_p = b+1$ 和 $q_0 = \frac{2Ep \times e}{h}$ 这两个公式可以直接得出:

$$P = xk B_p = m h x_p^I \quad (18)$$

其中 m 表示地基系数会随着土种类的不同而发生变化的一种比例系数, t/m^2 ; B_p 表示为桩正面计算的宽度值。

利用式(18)和式(17),可以得出

$$\frac{E \pi d^4}{64} \frac{d^4 x}{dy^4} = -m h x_p^I \quad (19)$$

上述公式属于锚固段抗滑桩在水平荷载作用下的挠曲微分方程。通过对此公式进行求解,可以得出新型变截面抗滑桩锚固段中任何一个截面的位移、转角以及剪力的表达式:

$$x_y = x_y A_1 + \frac{\varphi_A}{\alpha} B_1 + \frac{64 M_A}{\alpha^2 E \pi d^4} C_1 + \frac{64 Q_A}{\alpha^3 E \pi d^4} D_1 \quad (20)$$

$$\varphi_y = x_A A_2 + \frac{\varphi_A}{\alpha} B_2 + \frac{64 M_A}{\alpha^2 E \pi d^4} C_2 + \frac{64 Q_A}{\alpha^3 E \pi d^4} D_2 \quad (21)$$

$$M_y = \frac{\alpha^2 E \pi d^4}{64} (x_A A_3 + \frac{\varphi_A}{\alpha} B_3 + \frac{64 M_A}{\alpha^2 E \pi d^4} C_3 + \frac{64 Q_A}{\alpha^3 E \pi d^4} D_3) \quad (22)$$

$$Q_y = \frac{\alpha^3 E \pi d^4}{64} (x_A A_4 + \frac{\varphi_A}{\alpha} B_4 + \frac{64 M_A}{\alpha^2 E \pi d^4} C_4 + \frac{64 Q_A}{\alpha^3 E \pi d^4} D_4) \quad (23)$$

式中 x_A 表示桩顶部的位移,单位为m; φ_A 表示

转角, 单位为 $^{\circ}$; M_A 表示弯矩, 单位为 $t \cdot m$; Q_A 表示剪力, 单位为 t 。

上述公式中的 M_A 和 Q_A , 都需要利用悬臂段直接求出, 另外还需要抗滑桩锚固段桩顶的 x_A 和 φ_A , 才可以直接将锚固段各个位置上其他数值全部求出。根据变截面抗滑桩锚固段桩底内的边界条件, 可以直接确定变截面抗滑桩变截面位置最终的位移 x_A 和转角 φ_A 。按照工程实际条件, 求出相对应边界条件下锚固段桩顶的转角和位移, 并将其直接代入式(20)~式(23)中, 可以直接准确地求出抗滑桩锚固段中任意一个位置上的理论数值。

1.3 地基强度校核

抗滑桩锚固段桩身受到上部推力后, 桩身就会产生变形, 容易对桩前的土体造成压迫, 从而产生一种被动土的压力作用^[3]。当抗滑桩所承受的滑坡推力较大且超过抗滑桩锚固段桩周土体的被动土压力最大值时, 锚固段的土层在此作用下就会发生变化, 严重降低其自身的稳定性。因此, 在治理抗滑桩边坡过程中, 滑坡的推力必须较小, 且低于桩周土层可以允许的数值, 容许承载力的理论计算方式如下: 首先, 嵌固段属于土层时, 变截面抗滑桩嵌固段地层无论属于土层, 还是属于风化破碎岩层, 抗滑桩的水平压力都需要低于锚固段地层的横向容许承载力。当地面横坡 $i=\varphi_0$, 或者等于更小值时, 整个桩身的Y点横向容许承载力的公式表示为

$$\sigma \leq \frac{4}{\cos\varphi} \times [\gamma \times y \times \tan\psi + c] \quad (24)$$

式中, σ 表示锚固段横向压力最大值, 单位为 kPa ; λ 表示锚固地层的土地重度, 单位为 kN/m^3 ; ψ 表示地层土的黏聚力, 单位为 kPa ; y 属于变截面位置与计算点之间的距离, 单位为 m 。等地面横坡 i 大于 φ_0 时, 锚固段土层的Y点横向容许承载力公式表示为:

$$\sigma \leq 4 \times \gamma \times y \times \frac{\cos i \sqrt{\cos i - \cos i \psi_0} - \cos i \psi_0}{\cos \psi_0} \quad (25)$$

式中, ψ_0 属于锚固地层土体的一种综合摩擦角, 单位为 $^{\circ}$ 。

其次, 嵌固段属于岩层的时候, 锚固段地层土质属于岩质、半岩质时, 抗滑桩水平方向的压应力则需要满足以下条件:

$$\sigma_{\max} \leq \frac{1}{1.27} K_h \eta R \quad (26)$$

式中 K_h 表示岩层构造水平的一种换算系数, 通常取值范围为 $0.5 \sim 1.0$; η 表示岩石折减系数, 数值区间为 $0.3 \sim 0.45$; R 表示岩石单轴的抗压强度, 单位为 kPa 。

2 下圆上方型悬臂式填方路基抗滑桩在工程中的应用实例分析

以东格高速公路项目为例, 路线全长为 $43.511km$, 预估投资费用为 54.34 亿元。设计速度每小时为 $80km$, 汽车荷载等级为 1 级, 双向四车道, 路基总宽度为 $24.5m$, 建设工期为 3.5 年, 总占地面积为 $43.55hm^2$ 。本文主要对该路段中某段的抗滑桩进行计算, 所选取的这段路线采用填方通过。按照前述理论知识, 分别采用变截面悬臂式抗滑桩的形式和等截面悬臂式抗滑桩形式, 对该路段中某段的抗滑桩桩身的位移、转角、弯矩、剪力进行准确计算。通过不同形式的计算方式发现, 在该工程中新型的变截面悬臂式抗滑桩的桩身变形和转角更容易得到良好的控制。与传统方形截面抗滑桩的理论值相比, 下圆上方型的理论值较低, 桩身设计弯矩在悬臂端位置处完全一样, 弯矩的最大值也明显减小, 桩身弯矩的最大值位置出现下移, 且弯矩分布均匀, 新型变截面抗滑桩的剪力值为 0 。本文通过传统抗滑桩的设计方法研究出下圆上方型悬臂式变截面抗滑桩的计算方式, 并利用这种计算方法对东格高速公路中某段的抗滑桩分别按照不同的桩型进行计算, 发现下圆上方型悬臂式变截面桩在控制桩身变形、保持弯矩均匀分布方面更具优势。

3 结语

综上所述, 新型下圆上方型悬臂式变截面抗滑桩具有施工便捷、施工速度快, 成本低的优势, 能够确保施工人员的安全。本文通过对新型悬臂式变截面抗滑桩进行研究, 对桩身结构的受力机理进行探讨以及对比传统形状的截面悬臂式抗滑桩发现, 新型变截面抗滑桩桩身两侧的应力分布均匀且对称, 无任何明显的集中现象, 能够提高工程的稳定性。本次研究还有不足之处, 缺乏对多种变截面抗滑桩截面位置的对比, 缺乏对不同尺寸变截面抗滑桩的研究, 在后期研究中需要扩大研究的宽度, 优化探讨, 以此为其其他工程的应用提供重要依据。

参考文献

- [1] 李海光. 《铁路路基支挡结构设计规范》(TB 10025—2006)修订情况介绍[J]. 铁道工程学报, 2007, 24(1): 87-91, 101.
- [2] 林斌, 李怀鑫, 范登政, 等. 悬臂式抗滑桩受力特性分析及桩间距计算[J]. 人民长江, 2021, 52(4): 177-181.
- [3] 黄达, 冯开, 宋宜祥. 悬臂式抗滑桩三维土拱效应及桩间微桩加固作用机制研究[J]. 河北工业大学学报, 2021, 50(5): 79-88.